

OUTIL D'ANALYSE DE LA DURABILITÉ DE LA DÉMARCHE DE CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE BASÉE  
SUR LA NORME ISO 18458

Par  
Valérie Desormeaux

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue  
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Philippe Terrier

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Janvier 2020

## SOMMAIRE

Mots-clés : biomimétisme, développement durable, démarche de conception, norme ISO 18458, analyse de cycle de vie, Québec, conception biomimétique, Loi sur le développement durable

Le concept de biomimétisme est une approche de développement d'innovations assez récente qui peut permettre de répondre aux enjeux de développement durable actuels. C'est à travers l'analyse de systèmes biologiques et le transfert de ces apprentissages à des systèmes technologiques que les conceptions sont créées. Le concept est encore peu utilisé et peu connu au Québec, particulièrement dans le domaine de développement de technologies durables.

À ce jour, certains outils, tels que l'analyse de cycle de vie, ont été élaborés pour évaluer dans quelle mesure les innovations durables réduisent les impacts environnementaux. Néanmoins, ces outils ne permettent pas de déterminer si la durabilité peut être atteinte, notamment par la prise en compte des dimensions sociale et économique dans la démarche de conception.

Par conséquent, l'objectif général de cet essai est d'analyser si la démarche de conception biomimétique, basée sur la norme ISO 18458, permet d'atteindre la durabilité. Afin de réaliser cette évaluation, il a été nécessaire de développer un outil d'analyse. Par la suite, la pertinence et l'efficacité de l'outil ont pu être testées à l'aide d'une étude de cas fictif. L'efficacité des systèmes de traitement des eaux usées étant un enjeu majeur au Québec, une conception bio-inspirée d'un système de traitement d'eaux usées fut élaborée pour l'étude de cas analysée. La démarche de conception de cette dernière fut basée sur la norme ISO 18458, suivant ainsi une méthodologie rigoureuse et internationalement reconnue.

Cet essai a permis de faire ressortir plusieurs limites quant à la mise en œuvre du développement durable dans la démarche de conception d'innovations biomimétiques. Il serait donc recommandé de tenir compte des dix principes fondamentaux du biomimétisme dans la démarche de conception biomimétique présentée dans la norme ISO 18458. De plus, le Québec devrait investir dans la recherche et le développement dans ce domaine, de sorte que des plateformes québécoises d'échanges et de collaboration sur les connaissances acquises puissent être développées. Enfin, élaborer des indicateurs permettant d'identifier les avantages d'une approche de développement d'innovations basée sur le biomimétisme pour le développement durable semble essentiel.

## REMERCIEMENTS

Je souhaite d’abord remercier infiniment mon directeur d’essai, Philippe Terrier, qui a su, malgré son horaire très (trop) chargé, me supporter, me conseiller et m’aider à cheminer tout au long de ce processus. J’ai beaucoup appris grâce à toi, notamment sur le sujet, mais également sur d’autres aspects plus personnels. Tu es une véritable source d’inspiration, merci.

Un gros merci à Fannie, Karl, Cath et ma mère qui m’ont aidée à rendre un travail de meilleure qualité et plus songé. Vos questions et vos commentaires ont été très pertinents et m’ont permis de me dépasser et de pousser mes recherches plus loin encore.

Mon parcours durant la maîtrise fut surprenant, difficile, enrichissant, et bien plus encore, et jamais je n’y serais arrivée sans le support et la patience de mes parents, ma famille et mes amis. Je les ai abandonnés à plusieurs reprises et ils ont toujours été très compréhensifs, alors je vous remercie de tout mon cœur.

Finalement, un clin d’œil à ma très chère amie, ma coloc, ma sœur qui a enduré tous mes états d’âme, et tous les états de notre appartement, durant cette énorme aventure. Merci ma Ginette de m’avoir supportée, de m’avoir écoutée, de m’avoir fait rire, de m’avoir motivée et d’avoir tout simplement été présente.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
1. MISE EN CONTEXTE .....	4
1.1 Origine du concept .....	4
1.2 S’inspirer des formes, des matériaux et procédés, des écosystèmes .....	5
1.3 Stratégie et fonction; quelle différence?.....	6
1.4 Stratégies du vivant pour évoluer et s’adapter aux changements.....	7
1.5 Les principes du biomimétisme .....	8
1.6 Une démarche de plus en plus structurée .....	11
1.6.1 Des étapes de conception biomimétique bien définies.....	12
2. LE RÔLE DE LA CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE DANS LE DÉVELOPPEMENT DURABLE .....	14
2.1 Dimension environnementale .....	14
2.2 Dimension sociale et économique .....	15
3. LES APPLICATIONS DURABLES DU CONCEPT DE BIOMIMÉTISME .....	16
4. LES LIMITES DU CONCEPT DE BIOMIMÉTISME DANS LA MISE EN ŒUVRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE.....	18
5. L’OUTIL D’ANALYSE DE LA DURABILITÉ DES INNOVATIONS .....	20
6. MÉTHODOLOGIE POUR ANALYSER LA DÉMARCHE DE CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE BASÉE SUR LA NORME ISO 18458 .....	22
6.1 Les sources d’inspiration menant à la création de l’outil de validation de la durabilité des conceptions biomimétiques .....	23
6.1.1 La boussole Bernoise .....	23
6.1.2 Grille d’analyse de développement durable .....	23

6.1.3	La Loi sur le développement durable .....	24
6.1.4	Grille de cadrage pour la prise en compte des principes du développement durable .....	26
6.2	Liens entre les principes de la Loi sur le développement durable et ceux du biomimétisme .....	27
6.3	L'outil et les modalités de fonctionnement.....	27
6.3.1	Étapes pour la démarche de conception avec analyse de la durabilité .....	31
6.3.2	Exigences minimales de durabilité fixées dans l'outil .....	32
6.4	Pratiques et actions favorisant une démarche de conception ou une conception durable .....	33
7.	ÉTUDE DE CAS D'INNOVATION BIOMIMÉTIQUE .....	34
7.1	Mise en contexte menant à l'idée de conception .....	34
7.2	Méthodologie de la démarche de conception .....	35
7.2.1	Exercice de détermination de la pondération pour chacun des critères .....	35
7.2.2	Analyse fonctionnelle d'un système biologique.....	37
7.2.3	Abstraction du système biologique vers un modèle .....	40
7.2.4	Transfert et application du modèle pour la conception .....	43
7.3	Analyse de la durabilité de la démarche de conception et de la conception à l'aide de l'outil .....	45
7.3.1	Résultats et conclusions de l'étude.....	51
7.3.2	Pistes de bonifications.....	54
7.4	Limites de l'outil .....	56
8.	RECOMMANDATIONS.....	58
8.1	Prendre en compte les dix principes du biomimétisme dans la démarche de conception biomimétique présentée dans la norme ISO 18458.....	58

8.2 Investir dans la recherche et le développement pour l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques .....	58
8.3 Développer des plateformes québécoises de collaboration et de partage d'informations sur le biomimétisme .....	59
8.4 Allouer une période de temps dans la démarche de conception pour l'analyse des différentes avenues de conception.....	59
8.5 Développer des indicateurs permettant d'identifier les avantages d'une approche de développement basée sur le biomimétisme pour le développement durable.....	59
CONCLUSION .....	60
LISTE DE RÉFÉRENCES.....	61
BIBLIOGRAPHIE.....	67

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 6.1	Diagramme des étapes à suivre dans la démarche de conception avec analyse de la durabilité à l'aide de l'outil.....	32
Figure 7.1	Prototype de la conception biomimétique du traitement des eaux usées .....	44
Figure 7.2	Analyse du respect des exigences minimales de durabilité pour la conception biomimétique du traitement des eaux usées .....	51
Figure 7.3	Résultats de l'évaluation pondérée des critères pondérés à 5 pour la dimension environnementale.....	53
Figure 7.4	Résultats de l'évaluation pondérée des critères pondérés à 5 pour les trois dimensions ..	54
Tableau 1.1	Distinction entre stratégie et fonction dans le biomimétisme .....	6
Tableau 6.1	Liens entre les principes de la Loi sur le développement durable et du biomimétisme .....	27
Tableau 6.2	Outil d'analyse de la durabilité de la démarche de conception biomimétique .....	28
Tableau 6.3	Signification de la valeur nominale pour l'évaluation du critère .....	30
Tableau 6.4	Signification de la valeur nominale pour la pondération du critère .....	31
Tableau 6.5	Description des significations de la valeur nominale pour la pondération du critère.....	31
Tableau 7.1	Pondération des critères pour la problématique du traitement des eaux usées .....	36
Tableau 7.2	Collecte des principaux paramètres des deux types de systèmes pour la conception de traitement des eaux usées bio-inspiré .....	41
Tableau 7.3	Analyse de la durabilité de la conception biomimétique de traitement des eaux usées ....	46

## **LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES**

ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie
CPQ	Conseil du patronat du Québec
ETR	Éléments de terres rares
GADD	Grille d'analyse de développement durable
GES	Gaz à effet de serre
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
ISO	Organisation internationale de normalisation
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
OCEE	Office de la coordination environnementale et de l'énergie
OCR	Observatoire de la Consommation Responsable
OCSL	Omega Center for Sustainable Living
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi



## LEXIQUE

Absorption	Phénomène par lequel une substance solide, gazeuse ou liquide peut retenir une autre substance solide, gazeuse ou liquide dans l'intégralité de son volume (Larousse, s. d.a).
Adsorption	Phénomène de surface par lequel des molécules en phase gazeuse ou liquide se fixent sur la surface de solides pulvérulents ou poreux (Larousse, s. d.b).
Lipophile	Un composé chimique qui a une affinité pour les substances grasses. Ce composé a la capacité de se dissoudre dans les graisses (Olivier, 2015).
Particule en suspension	Fines particules de forme solide ou liquide, d'origine naturelle ou humaine, qui sont portées par l'eau ou par l'air. Il peut notamment s'agir de particules de cendre volante, de poussières, de fumées, etc. (Olivier, 2015).
Polaire	Une molécule dite polaire signifie que les charges électriques négatives et positives ne sont pas réparties de façon équitable entre les atomes formant la molécule. Cette polarité peut influencer des caractéristiques physiques telles que la solubilité ou des caractéristiques chimiques telles que la réactivité de la molécule (Olivier, 2015).
Système complexe	Comparativement à un système compliqué, ce type de système possède de multiples interactions, non linéaires, ainsi que des éléments hétérogènes, pouvant interagir sur des échelles de temps très variables, ce qui mène à l'apparition de niveaux d'organisations différents. Les interconnexions et l'information dans ce système sont abondantes, les états diversifiés et des évolutions sont possibles (Guespin-Michel, 2016).
Système compliqué	Un système compliqué possède des liaisons linéaires et stables qui sont souvent établies de façon rigide (Guespin-Michel, 2016).

Système endocrinien	« Le système endocrinien est un ensemble de glandes et de cellules qui fabriquent des hormones et qui les libèrent dans le sang. » (Société canadienne du cancer, 2020)
Terre rare	« Les éléments de terres rares (ETR) regroupent 17 éléments chimiques relativement abondants dans la croûte terrestre : les lanthanides (15 éléments, numéros atomiques 57 à 71), en plus du scandium et de l'yttrium. » (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles [MERN], 2019) Leurs propriétés uniques sont recherchées dans le domaine de la haute technologie. Elles sont utilisées, entre autres, dans la fabrication d'écrans d'ordinateur, de batteries rechargeables, d'éolienne, dans le raffinage du pétrole, etc. (MERN, 2019).
Toxique	Une substance est dite toxique lorsqu'elle peut entraîner un effet nocif sur l'environnement ou la diversité biologique, poser un danger pour l'environnement nécessaire à la vie ou représenter un danger pour la vie ou la santé de l'être humain (Gouvernement du Canada, 2017).

## INTRODUCTION

Les impacts des changements climatiques se font de plus en plus ressentir un peu partout, et les mesures pour y répondre appellent à des changements drastiques de paradigme dans le domaine de l'innovation. Depuis plusieurs années, des efforts sont investis par le gouvernement du Canada et les industries afin de développer des technologies propres. Ce qui est entendu par technologie propre c'est le processus, le bien ou le service grâce auquel une réduction des impacts environnementaux en comparaison aux normes établies par le milieu industriel est possible (Gouvernement du Canada 2017). Ce virage vert s'explique également par une volonté des consommateurs québécois de modifier leurs modes de vie et de consommation, et d'ainsi donc réclamer des industries qu'elles soient responsables. Les consommateurs québécois s'attendent, dorénavant, à ce que les entreprises se responsabilisent et s'impliquent sur le plan social et qu'elles soient également respectueuses de l'environnement (Institut de développement de produits, 2018).

Plusieurs méthodes de développement de technologies propres ont été élaborées à ce jour. Parmi celles-ci, la démarche de conception biomimétique basée sur le concept de biomimétisme en fait partie. Ce concept, tel que connu aujourd'hui, est assez récent et ne renvoie pas aux mêmes méthodes et à la même philosophie de conception bio-inspirée qu'auparavant. C'est-à-dire que désormais il s'agit d'une approche de conception pour le développement d'innovations durables (Gabillot, 2017). Ce concept consiste à analyser la nature pour concevoir des matériaux ou des procédés, des formes ou des écosystèmes pour l'usage humain. Il s'agit donc de traduire des processus biologiques en technologies (Lozeva, 2009).

Au Québec, le concept est encore peu connu et très peu utilisé. En effet, il est campé au stade de recherche et de développement en raison de sa complexité et de multiples limitations, qui seront abordées dans cet essai (S. Boucher, conversation, 1<sup>er</sup> octobre 2019). Néanmoins, les conceptions bio-inspirées durables sont de plus en plus recherchées pour faire face aux enjeux du développement durable dans plusieurs secteurs, tels que l'architecture. Le développement d'innovations qui tendent vers la durabilité ne doit pas seulement intégrer certaines composantes qui réduisent les impacts environnementaux, mais doivent plutôt trouver des solutions qui permettent d'atteindre et d'assurer la durabilité. C'est en intégrant des composantes biologiques dans la conception que plusieurs ont affirmé que le développement durable serait atteint. (Elmeligy, 2016).

Le concept de développement durable étant plutôt vaste, des outils tels que l'analyse de cycle de vie (ACV) ont été créés pour permettre de déterminer ce qui tend vers la durabilité ou non, grâce à la réduction de

leurs impacts sur les plans environnementaux, sociaux et économiques. Bien que l'ACV permette de réduire les impacts d'une innovation comparativement à une autre dès la conception, elle ne permet pas d'affirmer si l'innovation atteint la durabilité. En ce qui concerne les innovations bio-inspirées, les systèmes biologiques sont complexes et l'intégration de ces notions pour l'usage humain dans une optique d'atteinte du développement durable doit faire face à une analyse de conception poussée qui intègre toutes les variables. (De Pauw, Kandachar et Karana, 2017).

Par conséquent, l'essai s'inscrit dans l'optique de développer un outil susceptible de déterminer dans quelle mesure la durabilité d'une démarche de conception et de l'innovation qui en découle est atteinte. L'objectif général de cet essai est d'analyser si la démarche de conception biomimétique, basée sur la norme ISO 18458, permet d'atteindre la durabilité. Subjacent l'objectif général, des objectifs spécifiques ont été élaborés, notamment celui de développer un outil pour valider la durabilité des conceptions biomimétiques, faire des liens entre les principes du biomimétisme et ceux de la Loi sur le développement durable du Québec, et finalement démontrer la pertinence de l'outil à l'aide d'une étude de cas fictif.

Plusieurs sources d'inspiration ont permis de créer l'outil, notamment la Boussole Bernoise, la grille d'analyse de développement durable de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), ainsi que les principes de biomimétisme et de la Loi sur le développement durable du Québec. Afin que la démarche d'analyse de la durabilité puisse être reproduite pour comparer des démarches de conception d'innovations similaires entre elles, il est souhaitable d'analyser des démarches basées sur une méthodologie identique et rigoureuse, notamment selon la norme ISO 18458 Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologie. C'est pourquoi la démarche de conception biomimétique de l'étude de cas fictif fut basée sur cette norme.

Les principales sources qui ont permis de rédiger cet essai ont été sélectionnées en fonction de leur diversité, leur crédibilité, leur date de publication et leur pertinence quant à l'avancement du projet. Les propos tirés de ces sources ont également été contrevalidés à l'aide de sources affirmant des informations similaires ou identiques. Dans l'optique de développer un outil fiable et de qualité, les sources ayant servi à l'élaboration de l'outil sont toutes tirées d'instances reconnues telles que le gouvernement du Québec. Certains spécialistes du domaine du biomimétisme ont été consultés afin de dresser un portrait du Québec en ce qui a trait au développement de conceptions biomimétiques.

Dans le but de répondre à l'objectif primaire et ceux secondaires, l'essai a été subdivisé en huit chapitres. Le premier chapitre présente la mise en contexte de l'essai. Dans ce chapitre, l'origine du concept de

biomimétisme, son évolution à travers le temps, les principes qui le sous-tendent et tous les éléments nécessaires à la démarche de conception sont exposés. Les chapitres deux, trois et quatre abordent, respectivement, le rôle des conceptions biomimétiques dans le développement durable, les applications concrètes du concept en matière de développement durable et les limites du concept qui freinent l'essor du développement durable au sein de la démarche de conception. Le chapitre cinq dévoile l'outil actuellement utilisé pour analyser la durabilité des innovations. La méthodologie permettant de créer l'outil pour analyser la démarche de conception biomimétique basée sur la norme ISO 18458 est présentée au chapitre six. Ensuite, dans le but de tester l'efficacité de l'outil, une étude de cas fictif a été réalisée et les résultats sont traités au chapitre sept. Finalement, des recommandations ont été élaborées et sont proposées au chapitre huit. Celles-ci ont comme dessein d'arriver à créer une démarche de conception biomimétique axée sur le développement durable, de développer les connaissances sur le concept du biomimétisme et de le promouvoir sur la scène d'innovation pour le développement durable.

## **1. MISE EN CONTEXTE**

Dans l'optique de développer un outil permettant de déterminer dans quelle mesure l'aspect de durabilité, tel que visé par le concept de biomimétisme, a été intégré à la démarche de conception biomimétique, il s'avère essentiel de bien comprendre le concept en soi. C'est pourquoi sa provenance, son évolution, ses principes et tous les éléments nécessaires à la démarche de conception ont été examinés.

### **1.1 Origine du concept**

Grâce aux procédés et processus issus de la biodiversité, les espèces vivantes ont depuis des millions d'années évoluées, se sont perfectionnées et se sont ainsi adaptées aux changements et intempéries de l'environnement. C'est pourquoi il est possible d'observer à travers l'histoire de multiples formes d'imitations du vivant dans les conceptions, les innovations anthropiques et les organisations sociétales. Notamment, Leonardo Da Vinci, grâce à l'étude de la physiologie et du comportement des oiseaux et des chauves-souris, conçut différents prototypes de machines pour tenter de voler. (Schreiner, s. d.) Le tout premier vol d'avion ne se réalisa toutefois qu'en 1903 avec l'appareil des frères Orville et Wilbur Wright qui resta en vol pendant un peu moins d'une minute. Le mécanisme du modèle était lui aussi inspiré de la façon dont les oiseaux utilisent les courants d'air pour se soulever et faciliter les changements de direction (Scobey-Thal, 2014). De son côté, Georges de Mestral, durant une promenade dans les Alpes, s'inspira des fleurs de bardane et leurs nombreux crochets, qui s'étaient accrochés au poil de son chien, pour créer le velcro (Schreiner, s. d.). Le brevet de l'ingénieur fut largement connu dans les années 1960, lorsque la NASA l'utilisa dans les navettes spatiales pour empêcher la nourriture, l'équipement et d'autres articles de flotter en gravité zéro (Scobey-Thal, 2014). Néanmoins, le concept de biomimétisme à proprement parler est apparu pour la première fois à la fin des années 1960. C'est le biophysicien Otto Schmitt qui qualifia de biomimétique un développement de nouvelles technologies imitant des mécanismes ou procédés naturels. Le terme utilisé par Schmitt prit de l'ampleur et, cinq ans plus tard, fut adopté dans le dictionnaire de Webster (Scobey-Thal, 2014). C'est dans les années 90, subséquentement à des recherches sur le sujet, que la biologiste Janine Benyus publie son livre « Biomimicry : Innovation inspired by nature », dans lequel le concept de biomimétisme fut défini comme suit :

« une démarche d'innovation, qui fait appel au transfert et à l'adaptation des principes et stratégies élaborés par les organismes vivants et les écosystèmes, afin de produire des biens et des services de manière durable, et rendre les sociétés humaines compatibles avec la biosphère. » (M. Benyus, 2002)

À la suite de la publication de ce livre, Mme Benyus fit évoluer la pratique du biomimétisme, parlant partout dans le monde de ce qu'il y a apprendre de la nature. En 1998, elle co-fonda la première société de conseil bio-inspirée au monde, Biomimicry 3.8, et c'est en 2006, qu'elle co-fonda le Biomimicry Institute. L'Institut à but lucratif se consacre à faire de la biologie une partie naturelle du processus de conception d'innovation technologique. Elle agit également à titre de réseau pour des milliers d'étudiants et de praticiens et offre la base de données d'inspiration en biomimétisme la plus complète au monde, soit AskNature. (Biomimicry Institute, 2020)

## **1.2 S'inspirer des formes, des matériaux et procédés, des écosystèmes**

Dans son livre, Jeanine Benyus présente le biomimétisme comme étant l'analyse par l'humain du vivant pour concevoir de manière durable et reproductible des formes, des matériaux et procédés ainsi que des écosystèmes (M. Benyus, 2002).

La première dimension de conception a trait aux conceptions biomimétiques basées sur les formes. Dans cette optique, les formes du vivant peuvent être analysées dans tous les formats et dans toutes les tailles. Cette analyse aboutira à la création de produits qui imitent à la fois la forme analysée, mais aussi la fonction de cette forme. À titre d'exemple, la forme du train à grande vitesse japonais récemment créé est bio-inspirée du bec et de la tête du martin-pêcheur. En effet, l'oiseau peut passer rapidement d'un milieu peu dense, tel que l'air, à un milieu très dense, tel que l'eau. En reproduisant cette fonction, les nuisances sonores ont diminué, la consommation électrique du train a été réduite de 15 % lors de passage en tunnel et sa vitesse a augmenté de 10 %. (Ricard, 2015)

La deuxième dimension de conception est basée sur les matériaux, les procédés et les fonctions du vivant. La nature est apte à créer des matériaux parfaitement fonctionnels d'une grande complexité, et ce, à une température et une pression ambiante, sans utiliser aucun produit toxique. C'est pourquoi la bio-inspiration de la chimie des matériaux du vivant permettrait une rupture avec les modes de production actuels. Les céramiques produites à ce jour par l'industrie à des températures supérieures à 1 000 °C pourraient possiblement être remplacées par des céramiques résistantes et ductiles bio-inspirées de la coquille de l'ormeau rouge. Ce mollusque marin produit de la nacre, un composite naturel très résistant, non polluant et utilisant très peu d'énergie, et ayant des propriétés mécaniques supérieures à celles des céramiques utilisées par les militaires. De plus, des études ont été réalisées pour créer des blindages légers et des matériaux aéronautiques résistants à des températures élevées à partir des propriétés de l'ormeau. (Ricard, 2015)

Enfin, la dernière dimension de conception est la bio-inspiration des écosystèmes, en matière de durabilité, de productivité et d'adaptabilité. Les interrelations dans les écosystèmes sont complexes tout comme l'est leur imitation. Il existe plusieurs types de relations dans les écosystèmes qui permettent de maintenir un équilibre dynamique dans le long terme. Pour les nommer, il y a le mutualisme, la coexistence, le commensalisme, le parasitisme et la compétition. Ces relations évoluent en fonction du contexte et peuvent aussi cesser. Des espèces en compétition peuvent en effet, en raison d'un phénomène d'adaptation, modifier leur régime alimentaire, ce qui mettra un terme à la compétition. Les nombreuses recherches des biologistes à ce sujet ont permis de révéler que la coopération (mutualisme) est la relation fondamentale menant à l'innovation. À titre d'exemple, la végétation terrestre est le fruit d'une alliance entre une algue et des champignons qui ont mené à l'apparition des lichens. Et cette alliance a pu être réalisée grâce à l'alliance d'une algue bleue et d'une bactérie qui ont permis l'apparition des chloroplastes, ces organismes qui assurent la photosynthèse. Ainsi, les chloroplastes ont mené à l'émergence des plantes. Cette coopération est également possible entre animaux et végétaux, comme le démontre la relation symbiotique entre algues et coraux. (Ricard, 2015)

### 1.3 Stratégie et fonction; quelle différence?

Jusqu'à présent, la nature n'était considérée que comme une source en matériaux et en énergie. Désormais, grâce à de nouvelles connaissances techniques permettant d'examiner et de connaître précisément les structures, les processus, la logique et la façon dont le vivant fonctionne, la nature est perçue comme un modèle, un mentor. Ainsi, il est possible de s'inspirer du vivant et de produire des innovations qui intègrent ou imitent ses stratégies et fonctions afin d'optimiser les performances des technologies anthropiques. (Davies, 2014) Voici ce qu'on entend par stratégie et fonction :

**Tableau 1.1 Distinction entre stratégie et fonction dans le biomimétisme**

(inspiré de Biomimicry Institute, s. d.a)

	Définition	Exemple
Stratégie	Les organismes répondent aux besoins fonctionnels par des stratégies biologiques. Une stratégie biologique est une caractéristique, un mécanisme ou un processus qui remplit une fonction pour un organisme. C'est une adaptation de l'organisme pour survivre.	La fourrure de l'ours polaire est une stratégie d'isolation.
Fonction	Une fonction est le rôle joué par les adaptations ou comportements d'un organisme qui lui permettent de survivre.	La fonction de la fourrure de l'ours est d'isoler ou de conserver la chaleur.



Le biomimétisme pourrait ainsi permettre des progrès en matière de durabilité dans la gestion des matières résiduelles, l'efficacité énergétique, l'accès à l'eau potable, le transport, l'architecture, les matériaux, etc. (Stoppa, 2013). Néanmoins, selon certains, les tentatives pour imiter le vivant dans la conception d'innovations durables ne se sont pas avérées une réussite à ce jour. Cela pourrait s'expliquer, entre autres, par la complexité des infimes interrelations qui existent dans la nature et qui permettent aux organismes de mettre en œuvre ces stratégies et fonctions qui ne peuvent habituellement pas être prises en compte dans les innovations anthropiques (Organisation internationale de normalisation [ISO], 2015).

#### **1.4 Stratégies du vivant pour évoluer et s'adapter aux changements**

Dans le même ordre d'idées, les recherches réalisées dans le domaine du biomimétisme ont permis de dégager les stratégies du vivant qui leur permettent de survivre et évoluer. En 2015, plus de 2,5 millions d'espèces avaient fait l'objet d'une analyse dans laquelle leurs caractéristiques spécifiques étaient identifiées et décrites (ISO, 2015). Parmi les stratégies dégagées, quatre ressortent des recherches, notamment la résilience, la redondance, l'adaptation et l'auto-organisation. (Stoppa, 2013)

La première, soit la résilience, a trait à la capacité d'un système à supporter des perturbations sans que son équilibre soit irréversiblement perturbé. Les systèmes complexes sont ceux qui sont les plus résistants, tandis que les systèmes compliqués sont plus fragiles. La deuxième rend possible la première, c'est-à-dire qu'elle consiste en la présence de parties du système, qui se répètent et qui sont apparemment inutiles, mais qui sont indispensables au fonctionnement de l'ensemble du système. Cette redondance, présente dans chacun des systèmes biologiques, leur permet de survivre aux événements les plus inattendus et les plus dangereux, grâce à l'utilisation des éléments ou des caractéristiques vraisemblablement inutiles ou superflus d'emblée, mais dont l'existence s'explique seulement lorsque le besoin s'en fait sentir. (Stoppa, 2013) La capacité d'adaptation, quant à elle, est la vitesse à laquelle un système complexe retrouve son équilibre après qu'il ait été perturbé. Les organismes ont donc la possibilité de modifier leurs fonctions s'ils sont confrontés à des changements qui perturbent leur environnement, leurs conditions de vie et leur équilibre. Il existe deux types de capacité d'adaptation. D'abord, la capacité d'adaptation d'un organisme peut survenir lorsqu'un événement perturbant se produit, ce qui mène à des changements physiologiques et morphologiques réversibles qui ne peuvent pas être transmis de façon héréditaire. Le second type d'adaptation est le résultat de la sélection naturelle, générant des caractéristiques génétiquement transmissibles qui permettront d'augmenter la probabilité de survie des individus qui en sont pourvus. (Stoppa, 2013) Appliquée à une conception biomimétique, cette capacité permet d'étirer le cycle de vie du produit. En effet, une innovation biomimétique pourrait être conçue de façon à s'adapter, évoluer et

se modifier en fonction des changements technologiques et environnementaux, du climat économique et social, ainsi que de la demande. Les conceptions biomimétiques qui sont conçues avec une flexibilité, une modularité et une possibilité de reconfiguration de leur performance, de leurs dimensions et de leur esthétique vont avoir un cycle de vie prolongé et donc être plus durables. Enfin, la quatrième et dernière stratégie, soit l'auto-organisation, ne dépend que des interactions locales entre les intrants environnementaux et les éléments uniques d'un système qui donnent naissance à des structures dynamiques organisées sur la base de leurs interactions mutuelles, sans avoir recours à un projet central externe. (Stoppa, 2013) Ce phénomène découle de l'interaction entre les éléments et est typique du système dans son ensemble. Les systèmes qui sont auto-organisés peuvent générer des structures et procédés garantissant leur évolution. Les caractéristiques de l'auto-organisation peuvent facilement être reproduites et sont donc plus malléables. Face à des conditions internes et externes changeantes, les systèmes ou organismes se modifient avec le temps pour adopter des caractéristiques d'auto-organisation et ainsi utiliser les désagréments environnementaux à leur profit et utiliser efficacement leurs ressources. Cette stratégie est la plus recherchée dans les conceptions biomimétiques durables surtout en ce qui concerne l'économie d'énergie et des ressources. (Stoppa, 2013) En appliquant ces stratégies et les fonctions du vivant à des innovations, elles pourraient permettre d'améliorer la performance environnementale du produit, et ce, à toutes les étapes du cycle de vie, comme mentionné plus haut. (Biomimicry Institute, s. d.b)

### **1.5 Les principes du biomimétisme**

En observant le monde du vivant, et ses stratégies d'adaptation, l'auteur Janine Benyus a développé les principes qui fondent désormais les bases du concept de biomimétisme. Le Biomimicry Institute, co-fondé par madame Benyus, a intégré certains de ces principes, parmi d'autres, à leurs méthodes de conception et a créé ce qu'ils appellent les principes du vivant. Les dix principes sont les suivants :

1. La nature capte et utilise l'énergie efficacement et dépend d'une énergie librement accessible et renouvelable :

Ce qui est entendu par librement accessible, c'est que les sources d'énergie sont réutilisables, locales et n'ont pas besoin d'être extraites d'une mine ou canalisées par des infrastructures non naturelles telles qu'un barrage hydroélectrique. Les organismes utilisent des procédés à faible consommation d'énergie pour réduire la quantité d'énergie dont ils ont besoin. (Biomimicry Institute, s. d.b)

2. La nature exploite les déchets comme ressources :

Dans la nature il est davantage question de décyclage que de recyclage, c'est-à-dire réutiliser, transformer un déchet ou produit inutile pour en créer un matériau ou produit de moins bonne qualité ou valeur que l'original (*Mots Avec*, 2015). Dans la nature, nombreux sont les écosystèmes dans lesquels les organismes brisent des molécules et des matériaux organiques complexes en molécules plus petites qui peuvent ensuite être absorbées et réassemblées dans des matériaux entièrement nouveaux. (Biomimicry Institute, s.d.b) La production de biomasse dans un écosystème mature s'équilibre avec les cycles de recyclage, dans une optique de boucler les flux de matières et d'énergie (Ricard, 2015).

3. La nature s'approvisionne localement :

Les matériaux et ressources utilisés par la nature sont locaux, notamment en raison de l'impossibilité de la majorité des espèces à se déplacer sur de grandes distances (Ricard, 2015).

4. La nature optimise plutôt que maximise :

Un équilibre entre les ressources collectées et les ressources dépensées est recherché dans un système mature. Cet équilibre permet d'éviter les pénuries de ressources ou d'énergies qui compromettraient la survie et la reproduction des espèces (Ricard, 2015).

5. La nature se diversifie et coopère afin d'exploiter le plein potentiel de son milieu :

Les contraintes du milieu, telles que géologiques, géographiques ou climatiques, mènent les organismes à développer des relations de coopération qui aboutissent à des innovations. La plupart des relations de coopération n'occurrent pas uniquement entre deux organismes, mais parmi une multitude d'organismes distincts, dans un mélange de mutualisme et commensalisme (Ricard, 2015). Ainsi, « lorsqu'une niche est partagée l'allocation des ressources s'opère sans affrontements énergivores continus, de sorte que les richesses d'un habitat sont réparties de façons optimales. » (Ricard, 2015).

6. La nature fonctionne à partir d'informations :

La transmission d'informations de l'environnement entourant les organismes est nécessaire, car elle leur permet d'être en mesure d'agir de manière appropriée en réponse à cette information. Cette transmission et réception d'information peut se faire par des signaux entre deux organismes ou à

l'intérieur de leur corps. À titre d'exemple, l'information peut porter sur la température de survie ou l'oxygène disponible. L'utilisation de boucles de rétroaction permet de surveiller ces conditions. (Biomimicry Institute, s. d.b) Les canaux de communication et messages sont nombreux dans les écosystèmes. Ces messages, lorsque dirigés vers toute la communauté par des mécanismes de rétroaction, peuvent permettre à celle-ci de s'adapter aux changements affectant une composante de la communauté. Cette adaptation à l'environnement en évolution assure la durabilité de la communauté. (Ricard, 2015)

7. La nature utilise une chimie et des matériaux qui sont sans danger pour les êtres vivants :

Les organismes font de la chimie à l'intérieur et à proximité de leurs propres cellules, c'est pourquoi les produits et procédés chimiques et les matériaux de dérivés chimiques utilisés doivent supporter les processus vitaux. La chimie du vivant est à base d'eau. (Biomimicry Institute, s. d.b) Les substances toxiques existantes sont rapidement dégradables et sont utilisées seulement si nécessaires (Ricard, 2015).

8. La nature utilise les ressources rares et matériaux avec parcimonie :

Les matériaux utilisés par la nature sont abondants. Le carbone, l'azote, l'hydrogène et l'oxygène, telles sont les composantes chimiques utilisées dans la construction d'habitats. Ces composantes sont les plus faciles à trouver dans la nature, et ne sont pas extraites, traitées ou expédiées sur des milliers de kilomètres. (Biomimicry Institute, s. d.b) Les organismes utilisent peu de matériaux dans la construction de leur habitat, car les formes sont adaptées à la fonction. Certaines des structures permettent aussi de remplir d'autres fonctions et d'utiliser moins de ressources pour survivre. Les ressources circulent, mais ne diminuent pas (Ricard, 2015).

9. La nature maintient un équilibre avec la biosphère :

Les chances de survie augmentent lorsque les individus sont bons pour reconnaître les conditions locales et les opportunités. Elles augmentent également lorsqu'ils peuvent localiser et gérer les ressources disponibles. La survie dépend d'une réponse appropriée à l'information de l'environnement local. Les organismes utilisent les éléments cycliques prévisibles tels que les saisons ou les inondations annuelles, comme une opportunité pour évoluer. (Biomimicry Institute, s. d.b) Les principaux éléments biochimiques composant la biosphère, nécessaires aux processus de photosynthèse, de respiration, de croissance, de minéralisation et de décomposition qui sont

utilisés par la nature sont remplacés dans les mêmes quantités. Les réserves de ces éléments circulent, mais ne peuvent donc jamais diminuer. (Ricard, 2015)

#### 10. La nature adapte la forme à la fonction pour ne pas épuiser les ressources :

En utilisant leur forme pour atteindre des exigences fonctionnelles, les organismes peuvent accomplir la fonction en utilisant un minimum d'efforts, de matériaux et de ressources (Biomimicry Institute, s. d.b). Dans certains cas, grâce à l'évolution, une forme permet d'accomplir deux ou trois fonctions. Le réajustement des fonctions d'une forme permet de favoriser l'adaptation et la survie d'une espèce, sans une utilisation de ressources abondantes (Ricard, 2015).

### 1.6 Une démarche de plus en plus structurée

Afin d'encadrer la démarche de conception du biomimétisme, l'Organisation internationale de normalisation a créé la norme ISO 18458 Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologie. Elle présente le concept et ses possibilités d'utilisation, le processus d'abstraction et de mise en œuvre, les limites et le potentiel de la biomimétique et définit plusieurs termes. Selon la norme, une conception biomimétique peut se développer à partir de l'observation d'un système biologique et des connaissances acquises dans le domaine, et ainsi mener à la création de nouveaux produits (ISO, 2015). Ce processus se nomme « poussée biologique ». Ce type de processus est propice à l'élaboration de solutions pour les technologies futures qui ne sont encore que des perspectives d'avenir. Le velcro est un exemple de ce processus de développement. Toutefois, le développement peut aussi se faire par attrait technologique. C'est-à-dire que le développement d'une conception biomimétique se réalise dans le but d'améliorer ou d'offrir de nouvelles fonctions à un produit déjà sur le marché. La norme fait aussi la distinction entre le biomimétisme et la biomimétique. Le premier étant « la philosophie et approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle le vivant afin de relever les défis du développement durable. » (ISO, 2015). La biomimétique, quant à elle, est la

« coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines d'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques par le biais de l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, de leur abstraction en modèles ainsi que le transfert et l'application de ces modèles à la solution. » (ISO, 2015)

Selon Stéphane Boucher (conversation téléphonique, 1<sup>er</sup> octobre 2019), spécialiste en biomimétisme et conférencier, c'est le respect des trois conditions de base du biomimétisme, telles que défini par Janine

Benyus, qui présente un vrai gain en matière de développement durable. Ainsi, les trois conditions du biomimétisme se définissent comme suit : (Institut de biomimétisme, 2020)

- Philosophie : respect, responsabilité et gratitude envers l'environnement et les espèces. L'essence de l'éthique, des intentions et de la philosophie anthropique sous-jacente à la pratique du biomimétisme.
- Re-connecter : recréer un lien entre humain et nature. Pratique et état d'esprit pour reconnaître que l'humain et la nature sont forcément étroitement liés et non deux entités séparées.
- Imiter : c'est l'action de résoudre les problèmes à l'aide du biomimétisme pour minimiser les impacts anthropiques sur le milieu. Intégrer les principes, les modèles et les stratégies que l'on trouve dans la nature dans la conception de biens ou services pour améliorer les méthodes.

Cette dernière condition est celle la plus connue du biomimétisme et la plus respectée dans la démarche de conception. Néanmoins, sans l'application de ces trois conditions, il n'est pas question de biomimétisme (S. Boucher, conversation, 1<sup>er</sup> octobre 2019).

#### **1.6.1 Des étapes de conception biomimétique bien définies**

Par conséquent, la démarche de conception d'un système technique réalisée en conformité avec la norme ISO 18458 pourrait être qualifiée de système biomimétique. En effet, pour être considéré biomimétique, un système technique doit passer par trois étapes de conception, soit l'analyse fonctionnelle d'un système biologique disponible, l'abstraction du système biologique vers un modèle, le transfert et l'application du modèle pour la conception. La norme ne fait toutefois pas référence aux dix principes du biomimétisme. Il est nécessaire de mentionner que des conceptions conçues uniquement sur la base de la forme d'un système biologique et qui ne sont pas inclusives des fonctionnalités propres à la forme du système analysé ne seront pas considérées comme des conceptions biomimétiques ou du biomimétisme. (ISO, 2015) À titre d'exemple, le marché de Royan, en France, a été fondé sur la forme d'une coquille Saint-Jacques, de manière qu'aucun pilier à l'intérieur n'entrave la perspective (Dussol, 2016). Bien que la forme soit représentative d'une espèce, aucune fonctionnalité de celle-ci n'a été incluse dans la conception.

La démarche de conception biomimétique est un processus qui se fait en collaboration avec plusieurs experts issus du domaine de la recherche, tels que des biologistes, des chimistes, des ingénieurs, des physiciens, etc. Cette multidisciplinarité nécessite un langage commun qui permettra d'arriver aux

résultats convoités par les différents experts. Une terminologie commune doit donc être établie, pour réduire les perceptions spécifiques à chacun d’eux et ainsi réduire les malentendus. (ISO, 2015)

Le biomimétisme fait face à plusieurs limites dans son déploiement à grande échelle. Une des limites a été mentionnée plus haut, il s’agit du défi d’un processus de communication commun et d’un travail multidisciplinaire entre les différents experts (biologiste, ingénieur, etc.) (ISO, 2015). Cette multidisciplinarité nécessite un raisonnement systémique qui peut devenir laborieux. De plus, le système d’éducation actuel crée une division entre les sciences du vivant et l’ingénierie (*Paris Innovation Review*, 2012). Une autre des limites du biomimétisme est que cette science est complémentaire, et non pas une substitution aux processus de conceptions classiques en ingénierie. Ces processus classiques sont la base des développements techniques, et le biomimétisme est un outil de développement supplémentaire. De plus, la complexité des systèmes biologiques et leurs réponses face à des problèmes précis mènent à des structures uniques, et par le fait même, complexes. Celles-ci peuvent s’avérer difficiles à comprendre et à transférer à des problèmes techniques plus simples. La norme fait état d’une autre limite, soit le défi que représente l’abstraction des fonctionnalités d’un système biologique, fonctionnel à une échelle nanométrique, pour l’appliquer à une conception bio-inspirée qui sera fonctionnelle à une échelle macro métrique. Certaines des fonctions du système biologique ne trouvent sens qu’à l’échelle nanométrique. (ISO, 2015) La valeur économique de ce type de conception est difficilement mesurable et l’identification du marché pour lequel il doit être créé est laborieuse. Le retour sur investissement est donc incertain et c’est pourquoi il y a peu de financement pour des conceptions biomimétiques (*Paris Innovation Review*, 2012). Ainsi, les experts en biomimétisme Boucher et Terrier (2019) sont d’avis que les innovations actuelles sont de la biomimétique plutôt que du biomimétisme et que les experts respectent uniquement la condition d’émulation. Les raisons étant que la norme ISO Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologie n’est pas orientée vers le biomimétisme. En outre, la certification n’étant pas requise par le consommateur ou le gouvernement, les concepteurs ne voient probablement pas l’intérêt de l’obtenir en raison du coût (P. Terrier, courriel, 2019).

## **2. LE RÔLE DE LA CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE DANS LE DÉVELOPPEMENT DURABLE**

Pour résoudre la complexité des problèmes environnementaux, économiques et sociaux actuels, il sera nécessaire de renforcer l'approche conceptuelle actuelle et les outils méthodologiques de conception durable avec de nouveaux concepts, modèles et principes qui sont issus des systèmes naturels. Les modèles de conception environnementale actuels ont pour dessein de réduire les impacts des biens et services sur l'environnement, mais ne permettent pas de cheminer vers une durabilité à proprement parler. (Stoppa, 2013) En effet, l'absence de prise en compte des impacts sociaux et environnementaux dans la démarche de conception des innovations ne permet pas d'affirmer qu'elles ont un caractère durable, mais seulement un caractère environnemental (P. Terrier, courriel, 2019). Il ne s'agit donc pas d'une stratégie adéquate pour enrayer les impacts et ainsi protéger efficacement la biodiversité et répondre aux besoins des générations futures (Stoppa, 2013).

### **2.1 Dimension environnementale**

L'éco-efficacité est un concept populaire utilisé pour réduire les impacts environnementaux. Ce dernier réfère à une utilisation minimale des ressources et à une réduction progressive des impacts environnementaux dans la production de biens et de services tout au long du cycle de vie de ces biens et services, tout en répondant aux besoins de la population et en améliorant sa qualité de vie (*Termium*, 2016). Bien que le concept d'éco-efficacité ait permis de réduire l'impact environnemental de plusieurs produits, les données montrent malheureusement que la consommation totale des ressources naturelles a continué de croître. Cela s'explique par un manque de compréhension de la dynamique entre les différentes variables du produit et le système dans lequel il s'insère, ce qui entraîne un effet de rebond. Cet effet prend place lorsque la réduction de la pollution générée par un produit, entraîne une augmentation globale de l'utilisation de ce dernier, ce qui cause, par le fait même, une augmentation des impacts environnementaux. Pour s'attaquer à ces problèmes, c'est-à-dire l'effet de rebond et les stratégies environnementales actuelles infructueuses, il est nécessaire d'identifier, d'adopter ou d'ajouter d'autres stratégies, outre celles liées à l'éco-efficacité, dans la conception d'innovations durables. Ainsi, comme mentionné plus haut, le biomimétisme est une approche complémentaire et doit donc être associé à un autre concept, tel que les principes d'ingénierie durable, pour permettre la création d'innovations durables. Appliquées à des innovations bio-inspirées et à caractère durable, les stratégies utilisées par le vivant pour évoluer peuvent offrir des avantages environnementaux à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit. (Stoppa, 2013) Parmi ces avantages, il est question d'optimisation énergétique, de diminution des intrants chimiques, de progrès dans les échanges d'informations, de consommation



d'énergie et de matériaux avec parcimonie, de bouclage des flux, etc. (Gabillot, 2017 et Ricard, 2015). Les principes du biomimétisme établis par Janine Benyus sont inspirés des stratégies durables du vivant, ce qui signifie que la prise en compte de ceux-ci dans la conception d'une innovation biomimétique est favorable à sa durabilité.

## **2.2 Dimension sociale et économique**

En ce qui concerne les deux autres dimensions du développement durable, soit sociale et économique, bien qu'elles ne soient pas autant mises de l'avant par le concept, certains aspects permettent de les y intégrer. En effet, le biomimétisme est pensé comme une opportunité de produire des produits et services plus efficaces et performants, valorisant l'acquisition de compétences nouvelles et donc la création d'emplois. Parallèlement, une production circulaire à boucles courtes permet de valoriser les déchets et de les transformer en sous-produits et produits dérivés favorisant aussi la création d'emplois. (Ricard, 2015) Aux États-Unis, il pourrait générer un peu plus d'un million d'emplois d'ici 2025 (Commissariat général au développement durable, 2012). Ce concept est axé sur la coopération et la multidisciplinarité pour résoudre des problèmes techniques, sociaux, de gestion, etc. (*Paris Innovation Review*, 2012). Il est aussi estimé qu'en 2025, les innovations biomimétiques pourraient représenter 300 milliards de dollars dans le PIB américain. La réduction de consommation en ressource et des émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par l'utilisation du concept dans la production de biens et services pourraient rapporter 50 milliards de dollars. Une modification dans le mode de production et du paradigme en innovation pourrait permettre de transformer plusieurs industries, voir même, tous les secteurs économiques. Parmi ces secteurs, les services publics, le transport, l'industrie chimique, la gestion des matières résiduelles, l'architecture et l'ingénierie seront ceux qui seront davantage amenés à changer. Les produits bio-inspirés, du fait de leur efficacité énergétique, de la réduction de production de déchets ultimes, de leur meilleure performance, ont permis à des entreprises de doubler leurs ventes annuelles dans les dernières années. (Commissariat général au développement durable, 2012)

### 3. LES APPLICATIONS DURABLES DU CONCEPT DE BIOMIMÉTISME

Comme mentionné plus haut, les conceptions biomimétiques peuvent se trouver dans tout type de secteurs économiques (Commissariat général au développement durable, 2012). En économie circulaire, l'écologie industrielle est une forme de biomimétisme qui tente d'imiter les écosystèmes naturels dans un environnement industriel, notamment en imitant les processus qui se déroulent dans la nature, tels que le recyclage des déchets. À titre d'exemple, un parc éco-industriel (Kalundborg) au Danemark s'est inspiré des relations complexes de la nature pour établir la façon de distribuer et réutiliser l'énergie nécessaire pour alimenter les usines du parc. Le principe est basé sur des échanges d'eau et de vapeur, qui sont divisés en dix-neuf flux d'échanges entre les usines. En outre, la centrale électrique du parc industriel a également installé un système de désulfuration de ses émissions gazeuses. Ce système permet de réduire les émissions atmosphériques et permet également de produire du gypse. Ce gypse est désormais vendu à une des usines qui fabriquent des panneaux de construction et qui faisaient auparavant venir cette matière d'Espagne. Bref, l'écologie industrielle permet de faire des gains en matière de productivité, d'économie, d'énergie et d'environnement. (Creiser, 2008)

La diminution de l'utilisation des énergies fossiles est l'un des principaux enjeux pour arriver à réduire l'empreinte écologique des activités anthropiques. En ce sens, les sources d'énergie qui sont bio-inspirées de la photosynthèse de la flore pourraient être une solution. Des recherches sont présentement réalisées pour électrolyser l'eau et dégager de l'hydrogène d'une feuille artificiellement conçue afin de l'utiliser comme source d'énergie. Ce système est une forme de photosynthèse artificielle. Une autre avenue de production d'énergie durable est aussi explorée. En effet, des recherches se penchent sur la création de cellules solaires organiques captant l'énergie solaire pour la transformer en électricité par effet photovoltaïque. Les panneaux solaires photovoltaïques classiques, comparativement à ces cellules solaires organiques, nécessitent des matériaux difficilement recyclables et des ressources non renouvelables (terres rares) et difficilement accessibles. Ainsi, bien que la durée de vie des cellules soit plus courte, leur faible coût en énergie permettrait un renouvellement de celles-ci plus fréquent. (Ricard, 2015)

L'agriculture est aussi un des secteurs où les pratiques inspirées des fonctions des écosystèmes modifient les pratiques conventionnelles. La permaculture est une forme de biomimétisme qui imite les écosystèmes naturels à des fins agricoles. C'est donc une forme d'agriculture qui remet en cause les valeurs associées à l'agriculture industrielle, et qui promeut des valeurs telles que l'utilisation de ressources locales, une alimentation plus saine comparativement à l'agriculture industrielle, le communautarisme et la diminution des impacts sur l'environnement (Lozeva, 2009). Les secteurs de l'urbanisme et de l'architecture ont aussi

adopté des innovations bio-inspirées en se référant aux structures des écosystèmes et de la matière organique (Ricard, 2015).

En architecture, il existe des principes de durabilité qui peuvent réduire les impacts environnementaux. D'abord, celui de l'économie des ressources qui met l'accent sur la réduction, la réutilisation et le recyclage des ressources naturelles utilisées dans les structures. Ensuite, les conceptions doivent tenir compte du cycle de vie pour l'analyse du processus de construction et de son impact sur l'environnement. Il ressort de ces principes une ambition présente et future en matière d'innovations pour la promotion de solutions écologiques dans l'architecture afin de préserver les ressources et de les utiliser avec parcimonie. C'est pourquoi le biomimétisme se révélerait peut-être simplement la voie possible pour l'atteinte de cet objectif, car il est un outil pour accroître la durabilité des produits, des matériaux et des constructions conçus par l'Homme. (Elmeligy, 2016) Le biomimétisme fournit une large gamme de solutions pour l'efficacité structurelle, l'économie d'eau, les systèmes sans déchets, l'environnement thermique et l'approvisionnement en énergie, qui sont essentielles pour toute conception de bâtiment durable. Les bâtiments auront moins d'impacts sur l'environnement s'ils sont conçus comme des écosystèmes et si les processus, la structure et les fonctions de la nature sont imités (Mirniazmandan et Rahimianzarif, 2017). Un des exemples architecturaux bio-inspirés et durables est le Treepods, une structure inspirée de l'arbre du dragon. L'objectif de ce projet est de créer un système de purification de l'air qui capte le CO<sub>2</sub>. La conception fournit un maximum d'ombre et sa structure permet également de supporter des panneaux solaires utilisés pour alimenter un système d'épuration de l'air. Il s'agit d'une conception qui prend en compte les aspects visuels et fonctionnels de l'arbre, en plus d'améliorer certains des aspects fonctionnels. (Rao, 2014)

Dans les matériaux et les procédés, l'approche de synthèse actuelle, comme pour la production d'énergie, repose énormément sur l'utilisation d'énergies fossiles. La production de polymère synthétique pour la fabrication de plastique en est un bon exemple. Le biomimétisme pourrait permettre de réduire cette utilisation de ressources non renouvelables et non durables. À titre d'exemple, des recherches ont été effectuées pour la conception d'innovations bio-inspirées par le byssus, filament sécrété par la moule pour s'accrocher à des surfaces solides. Ce filament est connu comme ayant les propriétés les plus adhérentes jusqu'à présent. L'étude et la compréhension du fonctionnement des protéines retrouvées dans le filament, ainsi que l'architecture tridimensionnelle de la substance ont permis de créer une colle pour produire un contreplaqué marin à partir de protéines de soja. Cette colle n'émet aucun polluant dans l'environnement intérieur et permet une grande adhérence. (Ricard, 2015)

#### **4. LES LIMITES DU CONCEPT DE BIOMIMÉTISME DANS LA MISE EN ŒUVRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE**

Dans un autre ordre d'idées, la complexité des interactions dans les systèmes analysés et l'indécision quant aux valeurs des paramètres appliqués pour le développement d'innovations biomimétiques ne permet pas encore d'atteindre un processus de développement durable en soi. Le transfert des fonctions du biologique vers le technologique est réalisé dans un contexte différent de celui du vivant. En effet, il est davantage adapté aux impératifs techniques et aux capacités du produit ou du service, ce qui fait en sorte que les fonctions sont difficilement adaptables à un contexte différent et ne seront donc pas aussi efficaces (Ricard, 2015). Il est également important de mentionner que l'imitation de la forme et des fonctions de l'espèce bio-inspirée n'augmente pas nécessairement la durabilité globale de la conception (Mirniazmandan et Rahimianzarif, 2017). Par exemple, la designer Marieka Ratsma et l'architecte Kostika Spaho se sont alliés pour créer des souliers qui ont la forme du crâne d'un oiseau. Bien qu'ils se soient inspirés de la nature et des fonctions inhérentes au squelette d'oiseau, notamment la légèreté et solidité des os, le produit a une fonction purement esthétique (Chalcraft, 2012). La durabilité globale des conceptions augmente lorsque des éléments tels que la provenance des matériaux servant à la création de la conception ou sa consommation énergétique sont pris en compte dans la démarche de conception du produit (P. Terrier, courriel, 2019). L'analyse de la durabilité d'une conception biomimétique doit donc être réalisée au cas par cas. De plus, certaines conceptions n'ont aucun avantage d'un point de vue environnemental en comparaison avec les produits qu'elles remplacent (Ricard, 2015). Effectivement, il arrive que la consommation en ressources naturelles et la pollution générée durant leur cycle de vie soient aussi élevées et parfois plus élevées. Ainsi, le transfert de formes, de fonctions, et de mécanismes du vivant à un modèle technologique ne permettrait pas d'obtenir des conceptions durables. (Gabillot, 2017) À titre d'exemple, la production de revêtements superhydrophobes, dont la conception est bio-inspirée du lotus, nécessite toujours du pétrole (Commissariat général au développement durable, 2012). Il est aussi possible que certaines conceptions présentent de nouvelles difficultés techniques, environnementales ou éthiques, posant donc un obstacle à leur pertinence et à leur durabilité (Ricard, 2015). Des « applications biomimétiques qui présentent un avantage environnemental peuvent procéder d'un détournement d'une fonction du vivant et non de son imitation. » (Ricard, 2015). Par exemple, des ingénieurs se sont inspirés de la structure des algues pour créer des algues artificielles qui captent l'énergie des vagues pour produire de l'électricité. Néanmoins, les algues ne produisent pas d'électricité naturellement, il s'agit d'une fonction qui leur a été ajoutée (Commissariat général au développement durable, 2012). Aussi, le détournement d'une fonction du vivant peut comprendre, entre autres, des

manipulations génétiques, qui sont questionnables d'un point de vue éthique (Gabillot, 2017). Il convient également de noter que les principaux investisseurs dans la recherche sur le biomimétisme appartiennent aux industries de la défense et à d'autres grandes entreprises internationales. Bien que le biomimétisme ait un potentiel de développement durable, les utilisations qui en sont faites dans certains secteurs peuvent causer des préjudices à l'environnement (Lozeva, 2009).

## 5. L'OUTIL D'ANALYSE DE LA DURABILITÉ DES INNOVATIONS

La démarche de conception biomimétique, ainsi que la conception en soi, basées sur le biomimétisme, visent l'atteinte de la durabilité au même titre que les systèmes biologiques qui en sont l'inspiration. Cependant, les outils actuellement utilisés pour analyser la durabilité d'une conception ne permettent pas de déterminer si l'innovation permet d'atteindre la durabilité, mais détermine plutôt si celle-ci réduit les impacts environnementaux actuels. Par conséquent, l'outil d'analyse de cycle de vie des biens et services, qui mise sur l'éco-efficacité de systèmes déjà existants, ne permettrait que de moins polluer et non de trouver de nouvelles solutions durables. À travers des limites de conception préalablement définies pour les paramètres du système à développer, cet outil compare généralement des solutions technologiques qui offrent les mêmes performances fonctionnelles. (De Pauw et al., 2017) Dans le développement de produits, le manque de temps dans le processus de conception entrave la possibilité de faire une analyse approfondie de toutes les avenues de développement possibles du système. En établissant des limites de conception pour les paramètres du système à développer, cela fait en sorte que certains des paramètres, tels que les interrelations entre des variables, ne sont pas pris en compte et ne sont pas développés. Ainsi, l'évaluation des produits existants peut conduire les concepteurs à réduire les impacts environnementaux du produit dans les limites fixées en tenant compte uniquement des résultats de l'évaluation pour améliorer le rendement du produit. Les impacts dudit produit seront certes réduits en ce qui concerne les limites établies, mais le produit ne permettra pas davantage d'atteindre la durabilité. Par exemple, une évaluation pour la pose de panneaux d'isolation de la façade d'un bâtiment existant informerait l'ingénieur des impacts environnementaux actuels associés à l'utilisation de tels panneaux. Suite à l'évaluation, les résultats mèneront l'ingénieur à utiliser des matériaux à faible impact, des matériaux recyclés, à améliorer l'efficacité du processus de production, etc. En effet, une analyse plus poussée du système qui tiendrait compte de l'interrelation entre plusieurs variables permettrait d'ajouter des fonctionnalités durables à l'innovation qui ne font pas partie de ses fonctions de base fondamentale. L'ingénieur pourrait alors élaborer un panneau avec des éléments permettant d'améliorer la qualité de l'air, d'accroître la biodiversité ou produire de l'énergie. (De Pauw et al., 2017) L'ACV pourrait ensuite être utilisée en tenant compte des nouvelles fonctionnalités du produit, et donc l'élargissement des frontières du système étudié. Les systèmes biologiques sont complexes et l'intégration de ces notions pour l'usage humain dans une optique d'atteinte du développement durable doit faire face à une analyse poussée qui intègre toutes les variables. L'ACV a été développée pour évaluer les impacts que les produits ont sur l'environnement, plus particulièrement les impacts potentiellement nocifs. En revanche, le biomimétisme vise à créer des impacts bénéfiques. L'évaluation de ces impacts bénéfiques nécessite l'inclusion du contexte dans lequel

les impacts se produisent. En incluant le contexte du produit dans l'évaluation, il est possible de déterminer si les impacts qui se produisent tout au long du cycle de vie du produit sont bénéfiques ou potentiellement dangereux. (De Pauw et al., 2017) De plus, les outils d'ACV évaluent la performance des produits en matière de réduction des impacts environnementaux qui contribuent à tendre vers la durabilité dans les systèmes de production actuels. Tandis que la démarche de conception biomimétique a pour objectif de créer des produits qui contribuent à un développement global de la solution durable, avec un changement des systèmes de production actuels (De Pauw et al. 2017). Ainsi, peu d'indicateurs permettent d'identifier les avantages d'un point de vue durable du biomimétisme et donc aucun outil à ce jour ne mesure ou n'anticipe les retombées économiques du biomimétisme. (Ricard, 2015) Bien qu'il existe une norme pour la démarche de conception biomimétique (ISO 18458, 2015), il n'existe aucune certification ou reconnaissance du caractère biomimétique de la conception. L'absence de contraintes obligeant à prendre en compte les dimensions environnementale, sociale et économique lors de la démarche, ne favorise pas le développement de conceptions biomimétiques durables. (Gabillot, 2017) Aussi, il existe peu d'informations sur les produits, les procédés et les méthodes de conception, menant ainsi à une analyse difficile de la durabilité des innovations (Ricard, 2015).

Dans leurs efforts pour mettre au point des produits durables, les concepteurs et les ingénieurs auraient besoin de définir ou d'adopter des conditions qui décrivent ce qui est durable et ce qui ne l'est pas. Toutefois, définir de telles conditions de durabilité est une tâche complexe, car il n'existe pas d'ensemble unique et scientifiquement établi de conditions. Cette méthode d'évaluation, en fonction des conditions de durabilité, peut fournir une compréhension des facteurs de performance en matière de développement durable des produits alternatifs. Connaître les principaux enjeux de durabilité peut permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et le risque de choisir des solutions sous-optimales (qui peuvent produire des effets rebond lors de leur introduction).

## **6. MÉTHODOLOGIE POUR ANALYSER LA DÉMARCHE DE CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE BASÉE SUR LA NORME ISO 18458**

Dans l'optique de valider la durabilité de la démarche de conception biomimétique basée sur la norme ISO 18458, un outil d'analyse a été conçu. Cette démarche de conception, lorsque basée sur le concept du biomimétisme, a pour dessein d'atteindre la durabilité au même titre que les systèmes biologiques qui en sont l'inspiration. Comme mentionné au chapitre précédent, les processus d'analyse des outils présentement sur le marché pour valider la durabilité d'une conception offrent seulement des résultats quant à la réduction des impacts négatifs environnementaux, sociaux et économiques, et ne permettent pas de mesurer le niveau d'atteinte de la durabilité. En d'autres mots, ces outils permettent aux utilisateurs de réduire la non-durabilité de leurs services ou produits plutôt que de construire des services ou produits durables sous tous les angles.

Les raisons d'être menant à la création de cet outil sont nombreuses. D'abord, les conceptions bio-inspirées actuelles ne sont à proprement parler pas basées sur le concept de biomimétisme, mais plutôt sur un développement biomimétique, de telle sorte qu'elles ne sont pas durables (S. Boucher, conversation, 1<sup>er</sup> octobre 2019). Comme mentionné plus tôt, le biomimétisme signifie la bio-inspiration du vivant dans une optique de développer des innovations durables, tandis que la biomimétique ne se rapporte pas nécessairement au développement durable dans la conception, il s'agit seulement de l'aspect technique pour résoudre des problèmes pratiques (ISO, 2015). Ainsi, l'outil permettra de respecter les principes du biomimétisme et de répondre aux trois conditions du concept définies par Janine Benyus, soit la philosophie, la re-connection et l'imitation, ce qui rendra les conceptions durables. La multidisciplinarité et un langage commun adapté aux différents experts œuvrant dans le domaine sont des limites qui freinent l'essor du concept en développement durable. Donc, il s'agissait également de créer une ligne directrice de développement durable, un potentiel langage commun, pour les concepteurs dans le milieu. L'outil incite à de nouvelles façons de faire. Étant donné que le terme « développement durable » s'est répandu rapidement et a été utilisé de différentes façons dans de divers contextes (Riffon et Tremblay, 2016), il semble nécessaire de développer des outils qui permettent d'analyser dans quelle mesure le développement durable peut être atteint. Pour ce faire, une démarche rigoureuse de conception doit être entreprise et l'emploi de l'outil, créé dans le cadre de ce mandat, dans le processus de conception favorise cette rigueur.



## **6.1 Les sources d'inspiration menant à la création de l'outil de validation de la durabilité des conceptions biomimétiques**

L'élaboration de l'outil fut inspirée par plusieurs éléments, notamment par la collecte de données et la littérature. En effet, les recherches, qui ont mené notamment à la rédaction du chapitre 2 qui résume le rôle de la conception biomimétique dans le développement durable, ont permis de cibler de bonnes pratiques durables en développement biomimétique.

### **6.1.1 La boussole Bernoise**

Étant donné que les recherches et l'analyse critique du concept de biomimétisme qui précède sont basées sur des données qualitatives, l'outil a été créé afin de réaliser une analyse qualitative de la conception. Il semblait donc pertinent de s'inspirer de l'outil d'analyse « La boussole Bernoise », qui est lui aussi qualitatif. Ce dernier permet de mettre en évidence les aspects à améliorer d'un projet afin de concrétiser l'application et la pratique du développement durable. Il permet également de cerner les pistes d'amélioration (Office de la coordination environnementale et de l'énergie [OCEE] du canton de Berne, 2008). C'est la forme et le fonctionnement de l'outil plutôt que son contenu qui ont guidé la création de l'outil actuel portant sur le biomimétisme et la durabilité.

### **6.1.2 Grille d'analyse de développement durable**

En 2016, la Chaire en éco-conseil de l'UQAC a créé un outil (Grille d'analyse de développement durable [GADD]) permettant d'évaluer, à l'aide de questions, de quelle façon une politique, une stratégie, un programme ou un projet impactent favorablement les conditions humaines. Tout comme la boussole bernoise, la GADD permet de mettre en évidence les aspects à bonifier et les pistes pour y parvenir dans une optique d'amélioration continue. La grille est basée sur six dimensions, soit sociale, écologique, économique, culturelle, éthique et de gouvernance. (Université du Québec à Chicoutimi [UQAC], 2016) Pour la création du présent outil, seulement trois dimensions ont été retenues, soit celles indiquées dans la définition du concept de développement durable québécoise, sociale écologique et économique. Les objectifs de ces dimensions sont les suivants :

- « Économique : vise à répondre aux besoins matériels des individus et des collectivités, ainsi qu'à leur autonomisation financière.
- Environnementale : vise à répondre aux besoins de qualité du milieu naturel et de pérennité des ressources, ainsi qu'à la redéfinition des relations humain-nature.

- Sociale : vise à répondre aux besoins sociaux et aux aspirations individuelles et collectives, aux besoins de santé et de bien-être, aux besoins de qualité de vie. » (UQAC, 2016)

Dans le cas de la GADD, ce sont la forme et le contenu qui ont permis de façonner l'outil. En effet, certaines des questions de l'outil pour les trois dimensions mentionnées ci-haut étaient pertinentes dans le cadre d'une démarche de conception biomimétique.

### **6.1.3 La Loi sur le développement durable**

Au Québec, la Loi sur le développement durable a été créée pour que les instances gouvernementales intègrent le concept de développement durable dans leurs politiques, interventions, programmes et actions. L'article 6 de la loi établit 16 principes pour la mise en œuvre du développement durable, touchant ainsi les trois dimensions de ce concept, soit économique, sociale et environnementale. Les principes de la loi sont les suivants :

- « a) « santé et qualité de vie » : les personnes, la protection de leur santé et l'amélioration de leur qualité de vie sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Les personnes ont droit à une vie saine et productive, en harmonie avec la nature;
- b) « équité et solidarité sociales » : les actions de développement doivent être entreprises dans un souci d'équité intra et intergénérationnelle ainsi que d'éthique et de solidarité sociales;
- c) « protection de l'environnement » : pour parvenir à un développement durable, la protection de l'environnement doit faire partie intégrante du processus de développement;
- d) « efficacité économique » : l'économie du Québec et de ses régions doit être performante, porteuse d'innovation et d'une prospérité économique favorable au progrès social et respectueuse de l'environnement;
- e) « participation et engagement » : la participation et l'engagement des citoyens et des groupes qui les représentent sont nécessaires pour définir une vision concertée du développement et assurer sa durabilité sur les plans environnemental, social et économique;
- f) « accès au savoir » : les mesures favorisant l'éducation, l'accès à l'information et la recherche doivent être encouragées de manière à stimuler l'innovation ainsi qu'à améliorer la sensibilisation et la participation effective du public à la mise en œuvre du développement durable;
- g) « subsidiarité » : les pouvoirs et les responsabilités doivent être délégués au niveau approprié d'autorité. Une répartition adéquate des lieux de décision doit être recherchée, en ayant le souci de les rapprocher le plus possible des citoyens et des communautés concernés;
- h) « partenariat et coopération intergouvernementale » : les gouvernements doivent collaborer afin de rendre durable le développement sur les plans environnemental, social et

économique. Les actions entreprises sur un territoire doivent prendre en considération leurs impacts à l'extérieur de celui-ci;

i) « prévention » : en présence d'un risque connu, des actions de prévention, d'atténuation et de correction doivent être mises en place, en priorité à la source;

j) « précaution » : lorsqu'il y a un risque de dommage grave ou irréversible, l'absence de certitude scientifique complète ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir une dégradation de l'environnement;

k) « protection du patrimoine culturel » : le patrimoine culturel, constitué de biens, de lieux, de paysages, de traditions et de savoirs, reflète l'identité d'une société. Il transmet les valeurs de celle-ci de génération en génération et sa conservation favorise le caractère durable du développement. Il importe d'assurer son identification, sa protection et sa mise en valeur, en tenant compte des composantes de rareté et de fragilité qui le caractérisent;

l) « préservation de la biodiversité » : la diversité biologique rend des services inestimables et doit être conservée au bénéfice des générations actuelles et futures. Le maintien des espèces, des écosystèmes et des processus naturels qui entretiennent la vie est essentiel pour assurer la qualité de vie des citoyens ;

m) « respect de la capacité de support des écosystèmes » : les activités humaines doivent être respectueuses de la capacité de support des écosystèmes et en assurer la pérennité;

n) « production et consommation responsables » : des changements doivent être apportés dans les modes de production et de consommation en vue de rendre ces dernières plus viables et plus responsables sur les plans social et environnemental, entre autres par l'adoption d'une approche d'écoefficienne, qui évite le gaspillage et qui optimise l'utilisation des ressources;

o) « pollueur payeur » : les personnes qui génèrent de la pollution ou dont les actions dégradent autrement l'environnement doivent assumer leur part des coûts des mesures de prévention, de réduction et de contrôle des atteintes à la qualité de l'environnement et de la lutte contre celles-ci;

p) « internalisation des coûts » : la valeur des biens et des services doit refléter l'ensemble des coûts qu'ils occasionnent à la société durant tout leur cycle de vie, de leur conception jusqu'à leur consommation et leur disposition finale. » (*Loi sur le développement durable*)

Certains de ces principes ont permis de façonner l'outil, qui vise à analyser si la démarche de conception biomimétique permet de développer des innovations durables. Il s'agit des principes suivants :

- Santé et qualité de vie
- Équité et solidarité sociales
- Protection de l'environnement
- Efficacité économique

- Participation et engagement
- Accès au savoir
- Préservation de la biodiversité
- Respect de la capacité de support des écosystèmes
- Production et consommation responsables

Les huit autres principes n'ont pas été retenus pour élaborer l'outil pour diverses raisons. Le concept de biomimétisme est fondé sur des principes que la nature met en application, et ces principes sont pour la majorité environnementaux. Cela laisse donc croire que les aspects sociaux de la Loi, tels que le principe d'« équité et solidarité sociales », ne sont, en grande partie du temps et pour la plupart, pas mis en application dans le monde naturel. Bien que les conceptions soient des biens ou des services anthropiques et qu'elles pourraient donc intégrer des principes autres que ceux environnementaux, selon la démarche de conception actuelle, elles ne tiennent généralement pas compte des aspects économiques, de gouvernance, culturels et sociaux (P. Terrier, courriel, 2019). De plus, il a été considéré que certains principes, notamment ceux de « subsidiarité » et d'« accès au savoir », seraient difficilement intégrables à une démarche de conception biomimétique. Enfin, ces principes sont créés pour que les instances gouvernementales et les ministères développent des politiques, des stratégies, des programmes et des actions orientés vers le développement durable. La Loi n'engage pas encore les entreprises à suivre ces principes, car ils ne sont pas adaptés à la réalité et au contexte de celles-ci (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs [MDEP], 2009).

#### **6.1.4 Grille de cadrage pour la prise en compte des principes du développement durable**

Établissant ainsi 16 principes pour l'atteinte du développement durable, la Loi a souvent été utilisée pour développer des outils d'analyse de la durabilité d'innovations, de produits, de programmes, etc. (Riffon et Tremblay, 2016). Parmi les différents outils pour évaluer la durabilité, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDEP), a réalisé une grille de cadrage pour analyser les projets qui sont soumis à une évaluation environnementale. Ainsi, les concepteurs du projet peuvent évaluer en amont si leur projet répondra aux principes de la Loi, et donc aux enjeux du développement durable. Les possibles impacts pourront par la suite être mieux identifiés (MDEP, 2009). La forme et le contenu sont les

deux aspects qui ont servi à construire l’outil, au même titre que la GADD. Une fois de plus, seulement les questions ayant trait aux dimensions sociale, économique et environnementale ont été utilisées.

## 6.2 Liens entre les principes de la Loi sur le développement durable et ceux du biomimétisme

Il a été possible d’établir des liens entre certains principes de la Loi et ceux du biomimétisme, énoncés dans la mise en contexte. Établir ces liens entre les deux concepts permettra d’analyser si les conceptions biomimétiques intègrent les notions de développement durable établies par la Loi, mais aussi celles propres au biomimétisme, qui se veut une approche d’innovation durable. Les principes de la Loi ayant une relation avec ceux du biomimétisme ne sont, pour la plupart, pas liés à un seul des principes du biomimétisme, mais regroupent quelques-uns d’entre eux. Le tableau 6.1 présente les liens entre les différents principes.

**Tableau 6.1 Liens entre les principes de la Loi sur le développement durable et du biomimétisme**

Principes de la Loi	Principes du biomimétisme
Protection de l’environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La nature capte et utilise l’énergie efficacement et dépend d’une énergie librement accessible et renouvelable</li> <li>• La nature utilise une chimie et des matériaux qui sont sans danger pour les êtres vivants</li> </ul>
Participation et engagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La nature se diversifie et coopère afin d’exploiter le plein potentiel de son milieu</li> </ul>
Accès au savoir	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La nature fonctionne à partir d’informations</li> </ul>
Respect de la capacité de support des écosystèmes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La nature optimise plutôt que maximise</li> <li>• La nature maintient un équilibre avec la biosphère</li> <li>• La nature utilise les ressources rares et matériaux avec parcimonie</li> </ul>
Production et consommation responsables	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La nature exploite les déchets comme ressources</li> <li>• La nature s’approvisionne localement</li> <li>• La nature utilise les ressources rares et matériaux avec parcimonie</li> <li>• La nature adapte la forme à la fonction pour ne pas épuiser les ressources</li> </ul>

## 6.3 L’outil et les modalités de fonctionnement

L’outil est présenté sous forme de tableur Excel à la page suivante (tableau 6.2).

**Tableau 6.2 Outil d'analyse de la durabilité de la démarche de conception biomimétique**

Critères	Pondération	Évaluation du critère	Évaluation pondérée	Élément(s) de la conception permettant de répondre au critère	Pistes d'amélioration
<b>Environnementale</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
Le maintien de la biodiversité?			0		
La réduction de la quantité de contaminants et/ou déchets rejetée dans l'environnement?			0		
Une utilisation parcimonieuse des ressources renouvelables et non renouvelables?			0		
Un approvisionnement local?			0		
La réutilisation ou la valorisation des matières résiduelles, des ressources, des matériaux?			0		
L'utilisation de produits issus de la chimie verte ou bleue?			0		
La réduction et/ou la compensation des émissions de gaz à effet de serre?			0		
Une faible consommation énergétique?			0		
Une symbiose ou écologie industrielle?			0		
Un milieu de vie de qualité?			0		
<b>Sous-total:</b>			<b>0</b>		

Tableau 6.2 Outil d'analyse de la durabilité de la démarche de conception biomimétique (suite)

Critères	Pondération	Évaluation du critère	Évaluation pondérée	Élément(s) de la conception permettant de répondre au critère	Pistes d'amélioration
<b>Sociale</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
Des choix de consommation responsables?			0		
L'adoption de saines habitudes de vie?			0		
Un mode de vie de qualité?			0		
Le renforcement des connaissances sur les écosystèmes et les différentes espèces?			0		
La multidisciplinarité?			0		
Sous-total:			0		
<b>Économique</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
La création d'emplois ou le maintien d'emplois de qualité?			0		
Une économie circulaire, collaborative et/ou sociale?			0		
La valeur des services écosystémiques et les connaissances que nous en avons?			0		
Le partage de la richesse?			0		
Un niveau de vie de qualité?			0		
Une réduction des externalités économiques négatives?			0		
Sous-total:			0		
Total:			0		

Les critères ont été divisés en thématique, soit environnementale, sociale et économique. Ils ont été sélectionnés en fonction de tous les éléments mentionnés plus haut. Chaque critère peut être évalué sur une échelle de 0 à 3 (colonne évaluation du critère). Le tableau 6.3 présente la signification des valeurs nominales permettant d'évaluer les critères.

**Tableau 6.3 Signification de la valeur nominale pour l'évaluation du critère**

Valeur des critères	Signification
0	Ne s'applique pas à la conception
1	Aucun élément de la conception ne permet de répondre au critère
2	Certains éléments de la conception permettent de répondre au critère
3	Tous les éléments de la conception permettent de répondre au critère

Une colonne permet de décrire le ou les éléments de la conception permettant de répondre au critère. Cette description a pour but de mener à une démarche de conception rigoureuse, car, si rendus publics, les résultats d'analyse de la démarche de conception pour un bien ou un service quelconque pourront orienter d'autres concepteurs dans une démarche de développement durable. Suite à l'analyse des éléments manquants pour permettre de répondre aux critères et ainsi avoir une démarche de conception durable, des pistes d'amélioration devront être proposées. Une colonne a été créée à cet effet. La section « évaluation pondérée » peut être réalisée en multipliant la pondération et l'évaluation du critère pour chacun des critères. L'addition de toutes les valeurs nominales de l'évaluation pondérée par dimension mène à un sous-total, qui sera, lui, additionné pour toutes les dimensions et donnera le grand total. L'objectif est d'obtenir le maximum de points, signifiant ainsi que la conception est fortement axée sur le développement durable. Le pointage maximal est de 315 points.

Bien que certains critères fassent partie de l'analyse de la durabilité de la démarche de conception biomimétique, chacun d'eux revêt une importance relative qui dépend du contexte de conception (expertise des concepteurs, financement, etc.), des enjeux et préoccupations de la population, du milieu dans lequel la conception s'insère, de la fonction recherchée, etc. C'est pourquoi l'outil permet d'également tenir compte de la valeur de cette importance (colonne pondération). Le tableau 6.4 présente la signification des valeurs nominales déterminant la pondération des critères.



**Tableau 6.4 Signification de la valeur nominale pour la pondération du critère**

Valeur des critères	Signification
0	Ne s'applique pas à la conception
1	Critère non essentiel dans la conception
3	Critère souhaitable dans la conception
5	Critère impératif dans la conception

Le tableau 6.5 permet d'expliquer les significations afin que les concepteurs puissent faire une analyse éclairée sur l'importance du critère.

**Tableau 6.5 Description des significations de la valeur nominale pour la pondération du critère**

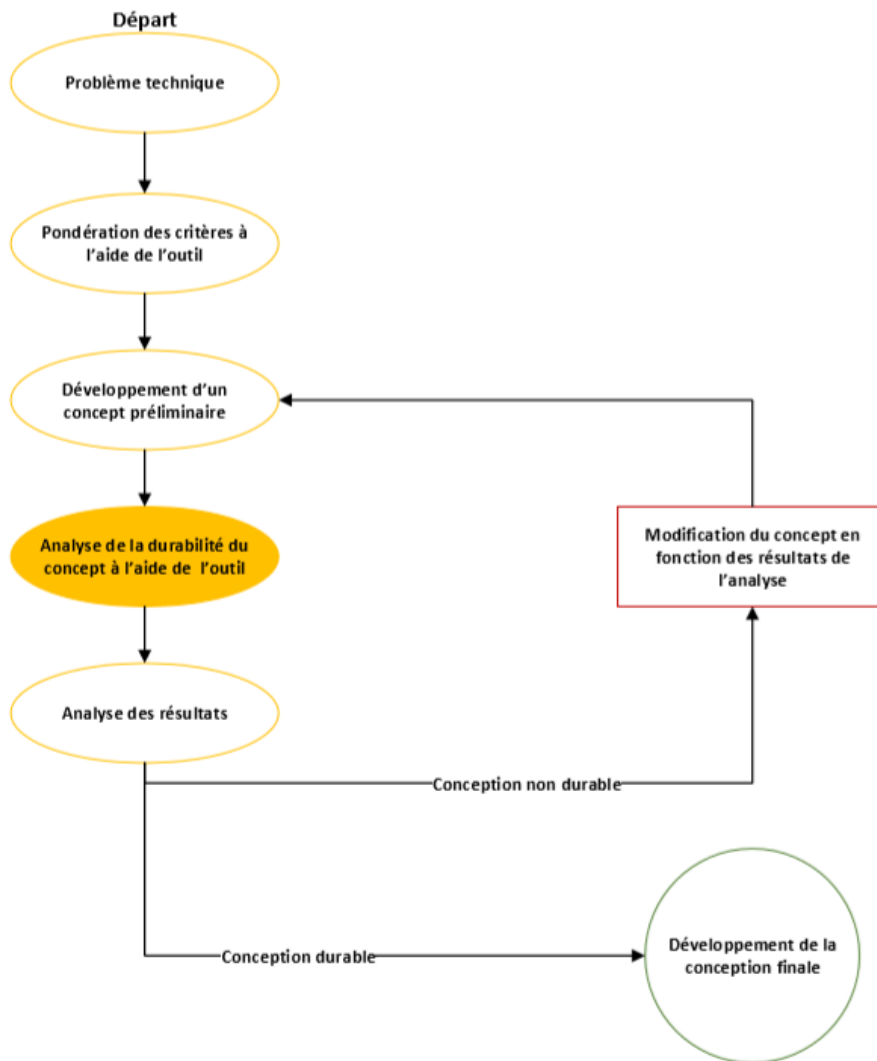
Signification	Description
Critère non essentiel dans la conception	Le critère n'est pas jugé important dans le contexte donné et n'est pas prioritaire
Critère souhaitable dans la conception	Le critère est jugé important, mais n'est pas prioritaire
Critère impératif dans la conception	Le critère est jugé important et prioritaire

Il est conseillé de faire cette analyse en amont, juste avant de débiter la démarche de conception, et après avoir ciblé une problématique technologique. Pour éviter tout biais, il est également conseillé que cette analyse soit réalisée par une équipe ou une personne différente de celle qui fera l'évaluation des critères et l'évaluation pondérée du projet en entier. Bien que l'évaluation puisse être basée sur des faits, des données ou à la suite de consultation des parties prenantes dans le projet, cette évaluation reste subjective. Dans l'ensemble, plus un critère est jugé important, plus il sera nécessaire d'en tenir compte dans la démarche de conception. Dans le cas où un critère est jugé important, mais qu'il n'a pas été pris en compte dans la démarche, il sera impérieux de mettre en œuvre des pistes d'amélioration.

### **6.3.1 Étapes pour la démarche de conception avec analyse de la durabilité**

L'objectif de l'outil est d'analyser la durabilité d'un projet de conception. Ainsi, il est essentiel de l'utiliser au moment approprié lors du développement du concept. Le diagramme suivant présente les étapes de la démarche de conception avec l'analyse de la durabilité, réalisée grâce à l'outil. Certaines des étapes du schéma sont facultatives. En effet, une fois que la durabilité de la démarche de conception préliminaire a été analysée grâce à l'outil, les pistes de bonification permettront d'améliorer la démarche et d'ainsi

développer un concept plus durable. Il va donc de soi qu'une nouvelle démarche de conception sera entreprise et s'il est souhaité, la durabilité de celle-ci pourra à nouveau être analysée.



**Figure 6.1 Diagramme des étapes à suivre dans la démarche de conception avec analyse de la durabilité à l'aide de l'outil**

### 6.3.2 Exigences minimales de durabilité fixées dans l'outil

Une fois l'analyse terminée et l'outil complet, un radar est automatiquement généré. Des exigences minimales de durabilité de la conception ont été déterminées par les concepteurs de l'outil. Ces exigences nécessitent que la performance de la conception dépasse minimalement le score de 1/3 des points totaux accumulables par dimension (environnementale, sociale, économique) afin que la démarche de conception puisse être considérée comme étant minimalement durable. De plus, les étapes facultatives

présentées dans la figure 6.1 quant à la modification de la conception s'avèrent nécessaires dans le cas où cette dernière ne rencontre pas ces exigences minimales de durabilité.

#### **6.4 Pratiques et actions favorisant une démarche de conception ou une conception durable**

Le tableau se trouvant à l'annexe 1 identifie des pratiques/actions par critère sur lesquelles le concepteur peut, entre autres, se baser pour déterminer si la conception ou la démarche de conception peut favoriser la durabilité. Ainsi, il s'agit de déterminer de quelle façon le critère peut être intégré dans la démarche de conception. Le tableau identifie également quel(s) principe(s) de la Loi sur le développement durable et du biomimétisme ont permis de développer le critère.

Pour obtenir l'outil et davantage d'informations sur son mode de fonctionnement, veuillez communiquer avec la personne concernée à cette adresse courriel : [valerie.desormeaux@usherbrooke.ca](mailto:valerie.desormeaux@usherbrooke.ca)

## **7. ÉTUDE DE CAS D'INNOVATION BIOMIMÉTIQUE**

Afin de tester l'outil, une étude de cas d'une innovation biomimétique, conçue à l'aide de la norme ISO 18458, et une analyse de la durabilité de la démarche de conception ont été réalisées. Cette étude fut basée sur un cas fictif, ceci s'expliquant par plusieurs raisons. D'abord, au Québec, les cas de conceptions biomimétiques sont encore peu nombreux, et pour la majorité, ancrés dans la recherche et le développement (S. Boucher, conversation, 1<sup>er</sup> octobre 2019). De plus, il n'était pas possible de recueillir suffisamment d'informations pour pondérer et évaluer les critères uniquement sur la base d'une revue littéraire. Enfin, la norme ISO 18458 est encore peu utilisée (S. Boucher, conversation, 1<sup>er</sup> octobre 2019) et, lors des recherches, aucun auteur ne mentionnait si la norme avait été utilisée lors de la démarche de conception d'une conception biomimétique. La conception en soi est inspirée d'une innovation qui a déjà été développée, mais l'étude de cas sera l'analyse d'une démarche de conception et d'informations fictives. Pour ces raisons, il est à noter que l'étude de cas est sommaire et donc plusieurs éléments sont manquants ou incomplets, notamment l'ingénierie du concept. La démarche de conception du cas fictif est basée sur les trois étapes présentées dans la norme ISO. La raison étant que la norme, bien qu'encore peu utilisée, sert de ligne directrice commune, et il sera donc possible par la suite de répliquer la méthodologie de conception et d'ainsi avoir une méthode rigoureuse.

### **7.1 Mise en contexte menant à l'idée de conception**

Au Québec, un des enjeux souvent abordés a trait à l'efficacité des systèmes de traitement des eaux usées. En effet, l'altération de la qualité des cours d'eau, principalement celle du fleuve Saint-Laurent, à la suite des rejets des eaux usées à l'environnement, est problématique. Les stations d'épuration actuelles ne permettent pas de traiter certains polluants, communément appelés polluants émergents. Parmi ces derniers, les œstrogènes ont plusieurs effets néfastes sur le milieu récepteur. (Kinnard, 2016) La perturbation du système endocrinien, la féminisation des poissons mâles, des anomalies au niveau du rein, du foie et des testicules, tels en sont des exemples observés chez la faune aquatique (De Champlain, Drogué K., et Van Coillie, 2013). Il existe également plusieurs autres polluants émergents qui affectent le système endocrinien, notamment les molécules provenant d'antibiotiques, d'antidépresseurs et de stéroïdes. Aussi, plusieurs produits de soins personnels et de nettoyage, les textiles, le papier, le plastique contiennent l'agent de conservation Triclosan. Cet agent de conservation antibactérien se trouve dans l'environnement en concentrations qui peuvent être nocives pour les organismes aquatiques et terrestres. Un produit considéré toxique se retrouve également dans les rejets d'eau à l'environnement, soit le Bisphénol A utilisé dans la production de plastiques de type polycarbonate et de résines époxydes tels que

les contenants pour aliments ou encore les équipements électriques. (Berryman, Rondeau et Trudeau, 2014) S'approvisionnant en eau potable dans le fleuve, des millions de Québécois sont à risques d'être affectés par les effets nocifs de ces polluants qui y sont rejetés, dû à l'incapacité des traitements d'eaux actuels de les éliminer. Certaines études dénotent que ces polluants peuvent affecter la glande thyroïde ou les testicules et augmenter les risques de cancer des testicules (Kinnard, 2016).

Il est à noter que les effets de ces polluants se manifestent à concentration très faible et ils sont donc difficilement détectables malgré leurs effets considérables (De Champlain et al., 2013). Ces polluants ne sont pas éliminés, notamment parce que les traitements d'eaux ne sont présentement pas adaptés pour éliminer d'aussi petites particules résistantes (Kinnard, 2016). À l'heure actuelle, ce sont les traitements biologiques qui sont les plus utilisés dans les stations d'épuration municipales et domestiques. Néanmoins, bien qu'efficaces sur des effluents contenant des composés biodégradables et de faible toxicité, les polluants émergents ayant des propriétés toxiques ou réfractaires perturbent ces systèmes de traitement biologiques (Kinnard, 2016).

Des études ont démontré la nécessité d'investir incessamment dans l'amélioration et la réparation des infrastructures de traitement d'eaux usées existantes au Québec, car les changements climatiques entraîneront de fortes pluies qui causeront davantage de débordement d'eaux usées s'écoulant directement au fleuve (Kinnard, 2016). Dans ce contexte, l'objectif de la conception qui sera élaborée, sera de concevoir un traitement d'eaux usées permettant d'éliminer ce type de polluants au Québec.

## **7.2 Méthodologie de la démarche de conception**

La démarche de conception pour le système de traitement des eaux usées a été orientée selon la norme ISO 18458. C'est dans une optique d'attrait technologique, tel que décrit dans la norme, qu'elle a été réalisée. Ce qui est entendu par attrait technologique, c'est que la conception biomimétique est une solution technique à un problème technique. Le but étant d'améliorer ou d'affiner un processus déjà existant (système de traitement des eaux usées) en concevant une innovation bio-inspirée.

### **7.2.1 Exercice de détermination de la pondération pour chacun des critères**

Avant toute chose, la première étape du processus de développement du concept a été de pondérer les critères selon leur niveau d'importance grâce à l'outil. Comme mentionné à la section 6.3, la pondération des critères doit se faire préalablement à la réflexion préliminaire du concept. Cette évaluation n'est pas basée sur l'idée de conception, mais bien sur le contexte du milieu dans lequel la problématique s'insère.

Pour la présente étude de cas, le milieu choisi est le Québec et plus spécifiquement la ville de Montréal. Le tableau 7.1 expose la pondération donnée à chacun des critères et met également en évidence les raisons menant aux résultats de cette pondération.

**Tableau 7.1 Pondération des critères pour la problématique du traitement des eaux usées**

Critères	Pondération
<b>Environnementale</b>	
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :	
Le maintien de la biodiversité?	3
La réduction de la quantité de contaminants et/ou déchets rejetée dans l'environnement?	5
Une utilisation parcimonieuse des ressources renouvelables et non renouvelables?	3
Un approvisionnement local?	1
La réutilisation ou la valorisation des matières résiduelles, des ressources, des matériaux?	3
L'utilisation de produits issus de la chimie verte ou bleue?	5
La réduction et/ou la compensation des émissions de gaz à effet de serre?	3
Une faible consommation énergétique?	1
Une symbiose ou écologie industrielle?	1
Un milieu de vie de qualité?	5
<b>Sociale</b>	
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :	
Des choix de consommation responsables?	0
L'adoption de saines habitudes de vie?	0
Un mode de vie de qualité?	5
Le renforcement des connaissances sur les écosystèmes et les différentes espèces?	1
La multidisciplinarité?	1
<b>Économique</b>	
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :	
La création d'emplois ou le maintien d'emplois de qualité?	3
Une économie circulaire, collaborative et/ou sociale?	3
La valeur des services écosystémiques et les connaissances que nous en avons?	5
Le partage de la richesse?	0
Un niveau de vie de qualité?	0
Une réduction des externalités économiques négatives?	0

Le contexte du milieu, les préoccupations et les enjeux soulevés par les parties prenantes, et la fonction recherchée par la conception sont les principaux éléments qui ont été considérés dans cette analyse. Il est à noter que cette analyse reste subjective. Les valeurs nominales des critères ont été attribuées notamment sur la base d'une recherche documentaire. Les quatre priorités d'intervention en matière de développement durable établies par la ville de Montréal pour 2016-2020 ont été considérées : (Ville de Montréal, 2016)

1. Réduire les émissions de GES et la dépendance aux énergies fossiles
2. Verdir, augmenter la biodiversité et assurer la pérennité des ressources
3. Assurer l'accès à des quartiers durables, à échelle humaine et en santé
4. Faire la transition vers une économie verte, circulaire et responsable

De plus, une pondération plus élevée a été accordée aux critères qui avaient un lien direct avec la fonction du système technologique à créer. En préconisant une approche d'évaluation basée sur la fonction, la démarche de conception est davantage orientée vers la méthodologie de conception biomimétique qui est également " fonctionnelle" (P. Terrier, courriel, 2019). Ainsi, la valeur 5 a été attribuée aux critères qui étaient directement liés à la fonction du système. Les critères qui ont obtenu un résultat de 3 sont ceux qui sont à prioriser par la ville de Montréal. Et enfin, certains critères ont obtenu la valeur 1, car ils ont été jugés pertinents, bien qu'ils ne soient pas intrinsèquement liés à la démarche de conception ou qu'ils ne soient pas pris en compte par la ville de Montréal.

Une fois cette analyse effectuée, la démarche de conception du système de traitement d'eaux usées bio-inspiré a pu débuter.

### **7.2.2 Analyse fonctionnelle d'un système biologique**

La première étape de conception, selon la norme ISO 18458, est de faire une analyse fonctionnelle d'un ou plusieurs systèmes biologiques dans l'optique de déterminer quelle(s) fonction(s) du vivant pourrait servir dans l'élaboration de la conception. L'analyse est une forme de modélisation des aspects fonctionnels du système biologique qui permet de comprendre son architecture, sa structure et son comportement. Durant le processus de modélisation, la fonction principale du système est divisée en sous-fonctions alternatives. (ISO, 2015)

Dans ce cas-ci, il a été nécessaire de se questionner sur la fonction d'un système d'épuration des eaux usées pour orienter les recherches afin de trouver un ou des systèmes biologiques pertinents. Ainsi, les fonctions visées sont notamment de décomposer des particules de polluants organiques ou de les séquestrer. Dans l'analyse, il est important de prendre en considération les propriétés physico-chimiques des polluants visés, notamment leur caractère lipophile et faiblement polaire, faisant en sorte que les molécules s'adsorbent aux particules en suspension dans les eaux usées. Les résultats d'études démontrent que les traitements d'eaux usées aérobies (présence d'oxygène) entraînent une dégradation biologique relativement rapide des hormones. Toutefois, lors de biodégradation anaérobie, les hormones semblent résister davantage (De Champlain et al., 2013).

Afin de trouver et analyser un système ou des sous-systèmes biologiques adéquats, la base de données « Ask Nature » a été consultée. Cette base de données permet de trouver des systèmes biologiques en recherchant par fonction du vivant. La recherche a permis de cibler deux systèmes et un exemple d'innovation biomimétique ayant des fonctions de décomposition, de purification et de séquestration. Ceux-ci sont décrits et expliqués ci-bas.

- Une éco-machine à l'image d'un écosystème naturel pour traiter et purifier les eaux usées

L'inventeur Jonathan Todd a créé un système de traitement des eaux usées sur mesure pour purifier l'eau sans produits chimiques en imitant un écosystème naturel. Composées d'une série d'écosystèmes microcosmiques, ces machines ont été conçues pour traiter différents types de flux de déchets, notamment les eaux usées ou des plans d'eau à forte teneur en nutriments. C'est l'interaction entre un ensemble diversifié d'organismes qui permet de nettoyer l'eau contaminée par des processus naturels, sans ajout de produits chimiques. La biodiversité est l'élément clé de la conception. Les éléments d'un écosystème naturel sont assemblés (par exemple, sous la forme d'une série de bassins aquatiques) et contiennent collectivement des organismes des cinq règnes de la vie. (The Biomimicry Institute, 2018a) Il est question ici du règne des monères, des protistes, des mycètes, des végétaux et des animaux (Bonnet, 2018). Les organismes de l'Eco-Machine finissent par décomposer les polluants présents dans les eaux usées introduites. Ensuite, ces matières décomposées sont retirées de l'eau grâce à d'autres organismes dans le cadre de leur cycle nutritif. Ainsi, plutôt que de les laisser s'accumuler comme déchets, ces nutriments sont utilisés pour produire plus de biomasse et soutenir la vie dans l'Eco-Machine. Les milieux humides sont l'un des principaux types d'écosystèmes imités dans les éco-machines, car ils contiennent généralement des espèces végétales qui prolifèrent et s'enrichissent dans l'eau et dans les environnements riches en nutriments. Certains modèles d'Eco-Machine, quant à eux, imitent les



écosystèmes du sol. (The Biomimicry Institute, 2018a) Ce type de système permet également de faire place à l'habitat d'espèces, telles que les poissons, les libellules et les oiseaux migrateurs (John Todd Ecological Design, s. d.b).

À titre d'exemple, l'entreprise John Todd Ecological Design a créé une Eco-Machine pour l'Omega Center for Sustainable Living (OCSL) où une combinaison de milieux humides construits à l'extérieur et de cellules aquatiques aérées est utilisée pour traiter jusqu'à 52 000 gallons par jour d'eaux usées domestiques. Les eaux usées du centre s'écoulent d'abord à travers une série de fosses septiques souterraines vers les réservoirs de stockage qui eux assurent le traitement primaire et l'élimination des solides décantables. À partir des fosses septiques, l'effluent est dosé en terrasses de 20 000 pieds carrés de milieux humides. Les eaux usées riches en nutriments sont consommées par les micro-organismes des racines et ensuite transformées en humus. L'effluent des milieux humides s'écoule ensuite dans les cellules aérobies du bâtiment de l'OCSL. Dans ces cellules, l'eau riche en éléments nutritifs forme la base d'un réseau alimentaire qui comprend une abondance d'organismes des cinq règnes de la vie. Les algues microscopiques, les champignons, les bactéries, les protozoaires, les escargots, les poissons et le zooplancton prospèrent tous dans le milieu aérobie diversifié des racines des plantes en suspension et contribuent à la consommation des nutriments restants et à la conversion des contaminants, produits nettoyants et produits pharmaceutiques en biomasse et eau propre. Finalement, un filtre à sable à recirculation assure l'élimination finale des solides en suspension et des agents pathogènes restants. (John Todd Ecological Design, s. d.a)

- Les processus métaboliques et d'oxydation utilisés par diverses espèces de champignons pour décomposer les structures d'hydrocarbures nocifs

Les champignons sont reconnus pour leur habilité à digérer une grande variété de substances. Parmi ces substances, le pétrole, la silice, le magnésium, le fer, le plastique et bien plus encore sont consommés par une espèce ou une autre de champignon. Une des fonctions qui a été étudiée dans le cadre de l'analyse fonctionnelle de ce système est sa capacité à décomposer des structures moléculaires de polluants. En effet, les processus métaboliques et d'oxydation utilisés par diverses espèces de champignons, dont les *Aspergillus ochraceus*, les *Cunninghamella elegans*, les *Phanerochaete chrysosporium*, les *Saccharomyces cerevisiae* et les *Syncephalastrum racemosum*, permettent de digérer les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en décomposant leurs structures. Ces polluants, de type organique, font partie d'un groupe de polluants environnementaux dangereux, dont beaucoup sont très toxiques, mutagènes ou cancérogènes. Bien que des époxydes de dihydrodiol et d'autres composés mutagènes et cancérogènes

aient été détectés comme métabolites fongiques mineurs de quelques HAP, la plupart des transformations effectuées par les champignons réduisent la mutagénicité des HAP et une fois qu'ils sont digérés en molécules, ces dernières sont détoxifiées. (The Biomimicry Institute, 2018b)

- La captation de fines particules alimentaires par les filtres alimentaires des salpes *Pegea confoederata*

L'analyse fonctionnelle des salpes marins *Pegea confoederata* a permis de constater que leurs filtres alimentaires capturent des aliments plus petits que leur maillage en optimisant l'écoulement de l'eau à travers leur filet à mucus collant sécrété en continu. Bien que ce ne soit pas commun de séquestrer des particules plus petites que la taille des mailles des filtres alimentaires d'un organisme, cette séquestration s'avère essentielle à la survie de la salpe, un organisme de la taille d'un ongle de main. Le processus de captation se fait comme suit; la salpe filtre par pompage rythmique l'eau de mer environnante dans son siphon oral, dans la chambre pharyngée et hors du siphon auriculaire. Lors de cette filtration, elle utilise ses muscles pour s'assurer que l'écoulement de l'eau se fait calmement et de façon ordonnée. En éliminant les effets de la turbulence, les très petites particules, comme les bactéries, les virus et les masses colloïdales entrent dans la chambre pharyngée et sont filtrés à travers un filet muqueux qui est continuellement sécrété et enroulé dans un brin alimentaire qui se déplace vers l'œsophage. La salpe peut collecter des particules plus petites que l'espacement des mailles des matériaux filtrant puisqu'elles se collent au filet muqueux sécrété en continu. Parfois, des particules encore plus petites que les bactéries, les virus et les masses colloïdales se diffusent directement dans le matériau filtrant. Les conditions mécaniques spécifiques du fluide que la salpe crée dans son système de filtration lui permettent de séquestrer des particules d'un diamètre aussi petit que 0,01 micron bien que le maillage du filtre mesure environ 1,5 x 6 microns. Cette adaptation permet aux salpes microscopiques de survivre puisqu'elles peuvent s'alimenter de certaines des plus petites formes de vie biologiques connues. (The Biomimicry Institute, 2018c)

### **7.2.3 Abstraction du système biologique vers un modèle**

L'étape précédente a permis de tirer des enseignements, des idées, des connaissances sur les différents systèmes naturels analysés. La deuxième étape consiste à faire l'abstraction de ces acquis vers des idées de conception technologique/anthropique pour résoudre le problème de traitement des eaux. Le modèle est pour ainsi dire une analogie des relations entre les paramètres des deux systèmes (biologique et technologique). Pour arriver à réaliser ce modèle, trois étapes doivent être suivies. D'abord, les

paramètres des deux types de systèmes doivent être collectés, soit le système naturel et le système technologique actuel non bio-inspiré et comportant des lacunes. Il est important de noter qu'il ne s'agit pas uniquement d'une compilation des paramètres physiques, mais aussi de certains facteurs subjectifs qui peuvent être pris en compte. Il s'avère pertinent d'analyser les deux systèmes séparément en premier lieu, afin de collecter tous les paramètres et non ceux qui sont seulement pertinents pour faire une analogie. Ensuite, des réseaux de relations et d'interactions entre les différents paramètres des deux systèmes doivent être construits. Il est possible d'ajouter de nouveaux paramètres à cette étape. Enfin, seules les relations essentielles, et donc seuls les paramètres pertinents, à la conception technologique doivent être retenus. (ISO, 2015)

Dans le cas de la démarche de conception de l'étude de cas, le tableau 7.2 résume les principaux paramètres qui ont été collectés lors de la première étape décrite plus haut pour arriver à l'abstraction du système biologique vers un modèle technologique.

**Tableau 7.2 Collecte des principaux paramètres des deux types de systèmes pour la conception de traitement des eaux usées bio-inspiré**

(inspiré de John Todd Ecological Design, s. d.a, John Todd Ecological Design, s. d.b, The Biomimicry Institute, 2018a, The Biomimicry Institute, 2018b, The Biomimicry Institute, 2018c et Ville de Montréal, s. d.)

Système biologique	Système technique
<p>Paramètres d'une éco-machine à l'image d'un écosystème naturel :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Purification de l'eau sans produits chimiques</li> <li>• Traitement des flux de déchets</li> <li>• Traitement des eaux avec des fortes teneurs en nutriment</li> <li>• C'est l'interaction entre les individus qui permet de nettoyer</li> <li>• Décomposition des polluants</li> <li>• Matières décomposées retirées de l'eau dans le cycle nutritif d'autres organismes</li> </ul>	<p>Paramètres d'un système de traitement des eaux usées au Québec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La première étape du traitement est le tamisage des gros débris, tels que les déchets, bouts de bois, poissons, etc.</li> <li>• La deuxième étape du traitement est la filtration pour purifier l'eau (85 % des bactéries éliminées)</li> <li>• Rétention des matières en suspension par le processus de filtration (sauf pour les plus petites particules telles que les bactéries)</li> <li>• Bassin de filtration d'un mètre d'épaisseur composé de sable de silice</li> </ul>

**Tableau 7.2 Collecte des principaux paramètres des deux types de systèmes pour la conception de traitement des eaux usées bio-inspiré (suite)**

Système biologique	Système technique
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Milieux humides les plus prospères pour le traitement des polluants dans l'eau</li> <li>• Habitat pour d'autres espèces</li> <li>• Milieu aéré (traitement des eaux aérobies)</li> <li>• Grande quantité d'eau traitée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une étape adjacente du traitement est l'utilisation d'un procédé de coagulation-floculation-décantation pour agglomérer les particules en suspension. Les particules agglomérées se déposent au fond du bassin de décantation et sont par la suite rejetées aux égouts</li> <li>• La troisième étape du traitement est l'ozonation de l'eau après la filtration pour éliminer les virus et bactéries restantes</li> <li>• La matière organique s'oxyde au contact du gaz (ozone), détruisant les bactéries et rendant inactifs les virus</li> </ul>
<p>Paramètres des processus métaboliques et d'oxydation utilisés par diverses espèces de champignons :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Digestion de substances polluantes (HAP, silice, pétrole, métaux, etc.)</li> <li>• Processus de métabolisation et d'oxydation pour décomposer des structures moléculaires de polluants</li> <li>• Digestion de polluants toxiques, mutagènes ou cancérigènes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• À des fins de consommation, l'ozone ne laisse aucun désinfectant résiduel dans l'eau, ce qui fait en sorte qu'une dernière étape doit avoir lieu pour empêcher la prolifération de bactéries</li> <li>• Utilisation du chlore dans la dernière étape avant la sortie de l'eau dans le réseau de distribution pour empêcher la prolifération de bactéries</li> <li>• Utilisation du chlore à la place de l'ozone dans certains systèmes de traitement</li> <li>• Dosage contrôlé du chlore nécessaire pour éviter une réaction chimique et l'émission de polluant</li> <li>• Incapacité des stations d'épuration actuelles à traiter certains polluants, communément appelés polluants émergents</li> </ul>

Lors de la deuxième étape de la démarche de conception de l'étude de cas, pour faire l'abstraction du système biologique vers un modèle technologique, des réseaux de relations et d'interactions entre les différents paramètres des deux systèmes ont été réalisés. Cette étape a permis de faire ressortir les paramètres communs suivants :

- Traitement des flux de déchets
- Décomposition de polluants

- Grande quantité d'eau traitée
- Séquestration de polluants toxiques, mutagènes ou cancérigènes
- Séquestration de substances polluantes (HAP, silice, pétrole, métaux, etc.)
- Processus d'oxydation pour décomposer des structures moléculaires de polluants
- Purification de l'eau
- Agglomération de particules
- Élimination des bactéries

Enfin, la dernière étape consistait à regrouper les paramètres pertinents à la conception. En mettant en évidence les relations et interactions des différents paramètres à l'étape précédente, chacun d'entre eux s'avère pertinent pour la conception. Les paramètres pertinents sont donc les mêmes que ceux présentés ci-haut. Il est important de rappeler qu'il s'agit d'une étude de cas fictif, la collecte des paramètres n'étant pas complète, elle n'a pas permis de pousser plus loin des deux étapes suivantes.

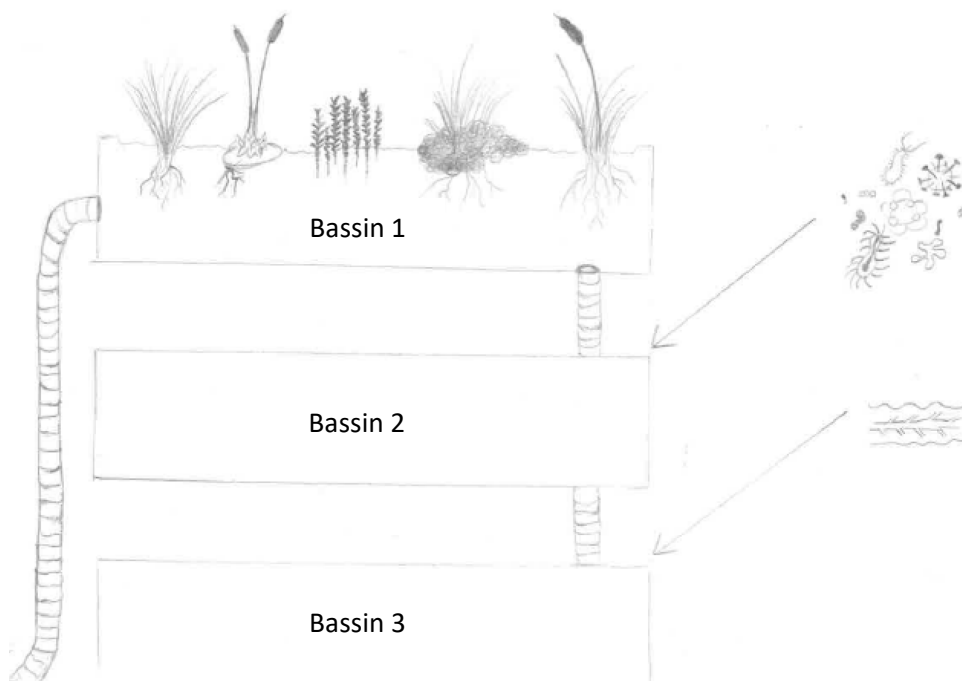
#### **7.2.4 Transfert et application du modèle pour la conception**

Durant, la dernière étape de conception biomimétique selon la norme ISO18458, le concept est modélisé. À cette étape,

« les objectifs et les exigences techniques de l'application prévue sont spécifiés en détail et examinés en termes de faisabilité. À cet effet, les spécifications techniques (listes d'exigences) sont établies et converties en spécifications d'exigences pour chaque personne impliquée dans le projet. » (ISO, 2015).

Des approches de mise en œuvre sont déterminées pour les paramètres pertinents choisis à l'étape précédente. Il s'agit donc de créer un prototype. Des variantes du prototype peuvent également être élaborées et analysées avec les critères de design appropriés. Vient ensuite le temps d'évaluer l'adéquation de la conception par comparaison entre l'état réel et l'état recherché au départ lors de la mise en œuvre dans l'application technique. Les résultats permettront d'optimiser et d'améliorer la conception et elle sera à nouveau soumise au cycle de développement. (ISO, 2015)

Pour la présente étude de cas, les paramètres pertinents, trouvés à la section 7.2.3, ont permis d'élaborer un modèle. La figure 7.1 présente le prototype.



**Figure 7.1 Prototype de la conception biomimétique du traitement des eaux usées**

Le prototype de traitement des eaux usées bio-inspiré est similaire à l'éco-machine créée par Jonathan Todd. D'abord, un système de canalisation transporte l'eau jusque dans un bassin. La canalisation est équipée de deux grilles qui permettent de tamiser les gros débris, qui sont ensuite redirigés vers un autre bassin et sont envoyés à un centre de traitement. Afin de minimiser l'impact au sol, le système est à la verticale et l'eau se déverse dans les différents bassins par une distribution gravitaire. L'eau est donc pompée de la canalisation vers le premier bassin de traitement. Ce dernier est analogue à un milieu humide. Des organismes y séquestrent certains des polluants. À titre d'exemple, des espèces végétales absorbent et séquestrent des contaminants, tels que les particules en suspension qui ont adsorbé certaines molécules de polluants émergents. Ces plantes une fois chargées des polluants sont retirées du bassin et remplacées par de nouvelles espèces. Ces plantes ont normalement une durée de vie utile de décontamination des eaux d'environ trois à quatre semaines.

Ensuite, l'effluent est rejeté dans un second bassin aéré où d'autres organismes permettront de purifier l'eau. Étant de type aérobie, le traitement est plus efficace pour faire la dégradation biologique des hormones. Ce bassin est composé de divers organismes faisant partie des cinq règnes de la vie, dont des types de champignons qui métabolisent et oxydent des molécules de polluants pour les décomposer. Certains organismes se nourrissent de ces matières décomposées. Tandis que d'autres organismes

séquestrent les polluants. Tous ces organismes consommeront les nutriments restants et convertiront les contaminants résiduels en biomasse et en eau propre.

Finalement, l'effluent sera dirigé vers un dernier bassin qui sera rempli de filtres muqueux collants, ayant la même fonction que les filtres alimentaires de la salpe *Pegea confoederata*. Ces filtres permettront de capter et de séquestrer les plus petites particules, tels que les hormones ou autres molécules de polluants émergents. Les filtres sont régulièrement changés. Ce type de traitement a été développé pour traiter une quantité d'eau de 40m<sup>3</sup> par 2 jours, considérant que les bassins sont de 2 mètres de profondeur, 5 mètres de largeur et de longueur et que le processus de traitement nécessite 2 jours complets. Dans cette étude, un seul système a été installé, mais plus d'un système pourrait être installé au centre de traitement.

### **7.3 Analyse de la durabilité de la démarche de conception et de la conception à l'aide de l'outil**

Une fois que toutes les étapes de précédemment décrites sont réalisées, l'outil développé dans le cadre de ce projet peut être utilisé (étape d'Analyse de la durabilité du concept à l'aide de l'outil du diagramme des étapes de la démarche de conception avec l'analyse de la durabilité, réalisée grâce à l'outil, présentée à la section 6.3.1). Le modèle préliminaire n'est parfois pas assez précis et développé pour permettre d'évaluer s'il répond ou non à tous les critères. C'est pourquoi il a été suggéré dans le diagramme présenté à la section 4.5 de mettre en œuvre des analyses supplémentaires, lorsque le concept est davantage développé et a été modifié selon les résultats obtenus par la première analyse de durabilité. L'outil peut aussi permettre d'analyser quelle variante, élaborée à l'étape de transfert et d'application du modèle pour la conception (section 7.2.4), est la plus durable. Dans le cadre de cette étude, seulement une variante du prototype a été développée et une seule analyse de la durabilité a été réalisée. Les pistes d'amélioration trouvées lors de l'analyse de la durabilité de la conception à l'aide de l'outil pourraient donc être appliquées dans le cas où une deuxième analyse serait réalisée.

La valeur nominale 0 (ne s'applique pas) a parfois été attribuée aux critères lorsqu'il était impossible de dire, pour l'instant, si la démarche de conception ou la conception pouvaient ou non répondre à celui-ci. Cela s'explique par le caractère préliminaire du développement du concept. Une telle situation est éventuellement décrite dans la colonne pistes d'amélioration, « à évaluer ultérieurement » du tableau 7.3. Ainsi, l'analyse de la durabilité de la démarche de conception a mené à un total de 91 points sur un grand total possible de 240 (en retirant les critères qui ne sont pas applicables pour ce cas fictif dans la pondération et l'évaluation).

**Tableau 7.3 Analyse de la durabilité de la conception biomimétique de traitement des eaux usées**

Critères	Pondération	Évaluation du critère	Évaluation pondérée	Élément(s) de la conception permettant de répondre au critère	Pistes d'amélioration
<b>Environnementale</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
Le maintien de la biodiversité?	3	2	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Composition des bassins de traitement avec organismes des cinq règnes de la vie indigène</li> <li>-Permet d'assurer une bonne qualité de l'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Intégration d'autres types d'écosystèmes que les milieux humides dans le processus de traitement</li> <li>-Favoriser des espèces à statut particulier</li> <li>-Vérifier les possibilités de développer le système à l'extérieur</li> </ul>
La réduction de la quantité de contaminants et/ou déchets rejetée dans l'environnement?	5	3	15	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonction principale de la conception; Éliminer les contaminants des eaux usées</li> <li>-Aucun produit chimique ou matière dangereuse dans le procédé</li> <li>-Procédure en cas de déversements (pour le réservoir de pétrole de la pompe)</li> </ul>	
Une utilisation parcimonieuse des ressources renouvelables et non renouvelables?	3	0	0		À évaluer ultérieurement
Un approvisionnement local?	1	0	0		À évaluer ultérieurement
La réutilisation ou la valorisation des matières résiduelles, des ressources, des matériaux?	3	2	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Valorisation des eaux usées</li> <li>-Compostage des plantes retirées du processus</li> <li>-Compostage des filets muqueux fabriqués avec des matériaux biodégradables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Matériaux des bassins et des tuyaux réutilisés ou valorisés</li> <li>-Analyse de cycle de vie de la conception</li> </ul>



**Tableau 7.3 Analyse de la durabilité de la conception biomimétique de traitement des eaux usées (suite)**

Critères	Pondération	Évaluation du critère	Évaluation pondérée	Élément(s) de la conception permettant de répondre au critère	Pistes d'amélioration
<b>Environnementale (suite)</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
L'utilisation de produits issus de la chimie verte ou bleue?	5	3	15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traitement et purification de l'eau ne nécessitant aucun produit chimique toxique ou nocif</li> <li>• Processus chimiques naturels de décomposition, d'oxydation, de séquestration des molécules polluantes</li> <li>• Aucun risque de modification des propriétés des polluants traités qui pourraient les rendre toxiques ou nocifs</li> </ul>	
La réduction et/ou la compensation des émissions de gaz à effet de serre?	3	2	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Séquestration du dioxyde de carbone par les espèces végétales</li> <li>• Compostage des filets muqueux fabriqués avec des matériaux biodégradables</li> <li>• Compostage des plantes retirées du processus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pompage de l'eau usée à l'aide d'énergies renouvelables</li> <li>• Matériaux sans pétrole pour les bassins</li> <li>• Matériaux locaux</li> </ul>
Une faible consommation énergétique?	1	2	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traitement de l'eau ne nécessitant pratiquement aucune énergie (traitement gravitaire, procédés naturels)</li> <li>• Compostage des filets muqueux fabriqués avec des matériaux biodégradables</li> <li>• Compostage des plantes retirées du processus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matériaux des bassins et des tuyaux avec matériaux recyclés</li> <li>• Pompage de l'eau usée à l'aide d'énergies renouvelables</li> </ul>

**Tableau 7.3 Analyse de la durabilité de la conception biomimétique de traitement des eaux usées (suite)**

Critères	Pondération	Évaluation du critère	Évaluation pondérée	Élément(s) de la conception permettant de répondre au critère	Pistes d'amélioration
<b>Environnementale (suite)</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
Une symbiose ou écologie industrielle?	1	0	0		À évaluer ultérieurement
Un milieu de vie de qualité?	5	2	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assure la qualité de l'eau</li> <li>• Favorise le maintien de la biodiversité</li> </ul>	Vérifier les possibilités de développer le système à l'extérieur
<b>Sous-total :</b>			<b>60</b>		
<b>Sociale</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
Des choix de consommation responsables?	0	0	0	<b>S. O.</b>	<b>S. O.</b>
L'adoption de saines habitudes de vie?	0	0	0	<b>S. O.</b>	<b>S. O.</b>
Un mode de vie de qualité?	5	2	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration de la qualité de l'eau rejetée à l'environnement et récupération et valorisation de l'eau usée (assure la mise en valeur du patrimoine naturel québécois)</li> <li>• Eau de qualité pour les activités récréotouristiques ou pour la consommation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimiser l'aménagement des lieux</li> <li>• Offrir des périodes pour pratiquer un sport durant le travail</li> <li>• Sensibiliser et informer les employés des bienfaits d'un mode de vie équilibré</li> <li>• Vérifier les possibilités de développer le système à l'extérieur</li> </ul>

**Tableau 7.3 Analyse de la durabilité de la conception biomimétique de traitement des eaux usées (suite)**

Critères	Pondération	Évaluation du critère	Évaluation pondérée	Élément(s) de la conception permettant de répondre au critère	Pistes d'amélioration
<b>Sociale (suite)</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
Le renforcement des connaissances sur les écosystèmes et les différentes espèces?	1	2	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Échanges entre experts de différents domaines pour connaître les systèmes biologiques et en faire l'abstraction</li> <li>• Élaboration de rapports de caractérisation des milieux humides et différentes espèces qui y vivent pour répliquer et maintenir le milieu et assurer le bon fonctionnement du traitement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégration d'autres types d'écosystèmes et organismes dans le processus</li> <li>• Rendre accessibles les rapports de caractérisation des milieux naturels et espèces</li> <li>• Informer la population de son rôle dans la protection des écosystèmes et des espèces</li> </ul>
La multidisciplinarité?	1	3	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implication de différents experts (biologistes, ingénieurs, botaniste, etc.) dans la démarche de conception</li> <li>• Usage de l'approche systémique</li> </ul>	
<b>Sous-total :</b>			<b>15</b>		

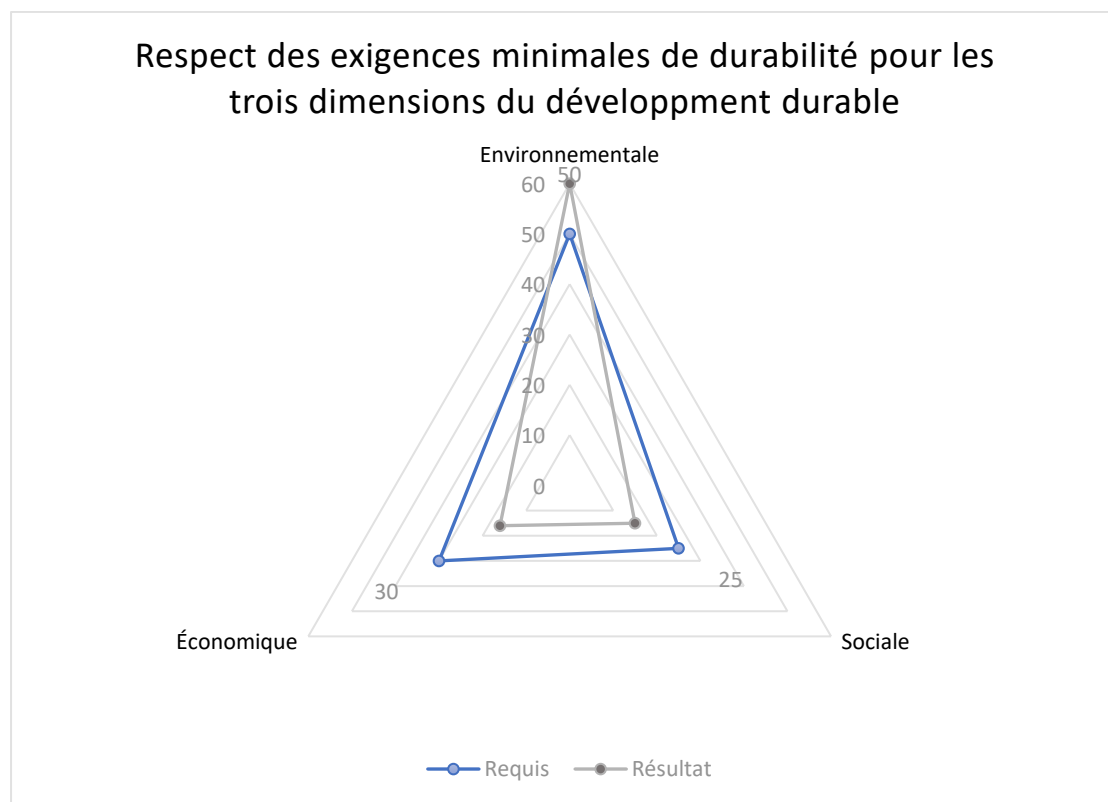
**Tableau 7.3 Analyse de la durabilité de la conception biomimétique de traitement des eaux usées (suite)**

Critères	Pondération	Évaluation du critère	Évaluation pondérée	Élément(s) de la conception permettant de répondre au critère	Pistes d'amélioration
<b>Économique</b>					
La démarche de conception et/ou la conception favorisent-elles :					
La création d'emplois ou le maintien d'emplois de qualité?	3	0	0		À évaluer ultérieurement
Une économie circulaire, collaborative et/ou sociale?	3	2	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valorisation des eaux usées, compostage des plantes retirées du processus, compostage des filets muqueux fabriqués avec des matériaux biodégradables (allongement de la durée d'usage)</li> <li>• Conception destinée à répondre aux besoins de la collectivité</li> <li>• Démarche d'éco-conception</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégration du recyclage</li> <li>• Alliance avec d'autres industries pour favoriser l'écologie industrielle</li> <li>• Création d'emplois de qualité <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gouvernance démocratique dans l'entreprise</li> </ul> </li> <li>• Recourir aux services d'une entreprise d'économie sociale</li> </ul>
La valeur des services écosystémiques et les connaissances que nous en avons?	5	2	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Écosystèmes naturels utilisés plutôt qu'une innovation technique</li> <li>• Évaluation des avantages entre un système naturel et un système technologique</li> <li>• Recherches sur le sujet</li> </ul>	Offrir des informations sur le sujet à la collectivité sur Internet
Le partage de la richesse?	0	0	0	S. O.	S. O.
Un niveau de vie de qualité?	0	0	0	S. O.	S. O.
Une réduction des externalités économiques négatives?	0	0	0	S. O.	S. O.
<b>Sous-total :</b>			<b>16</b>		
<b>Total :</b>			<b>91</b>		

Note : S. O. signifie sans objet

### 7.3.1 Résultats et conclusions de l'étude

À la lumière des résultats obtenus après l'analyse de la démarche de conception, il est possible d'affirmer que cette démarche nécessite une révision et une amélioration du prototype. En effet, avec un résultat de 91 points sur 240 possibles, la durabilité de la démarche de conception est de 38 %. Comme prévu, les résultats ont permis de générer un radar afin de déterminer si les exigences minimales de durabilité avaient été atteintes pour chacune des dimensions. Ces exigences sont de 1/3 des points totaux accumulés par dimension. Ce radar permet donc d'analyser si la démarche de conception est minimalement durable bien qu'elle ait obtenu un résultat de 38 %. Les valeurs nominales aux extrémités du triangle bleu sur la figure 7.2 sont les points minimums à obtenir pour chacune des dimensions afin de respecter les exigences minimales en matière de durabilité établies à la section 6.3.2. Le triangle gris exprime les résultats obtenus à la suite de l'analyse de la durabilité pour chacune des dimensions. Ainsi en comparant les deux triangles, il est possible de considérer l'écart entre les requis en matière de durabilité et les résultats.

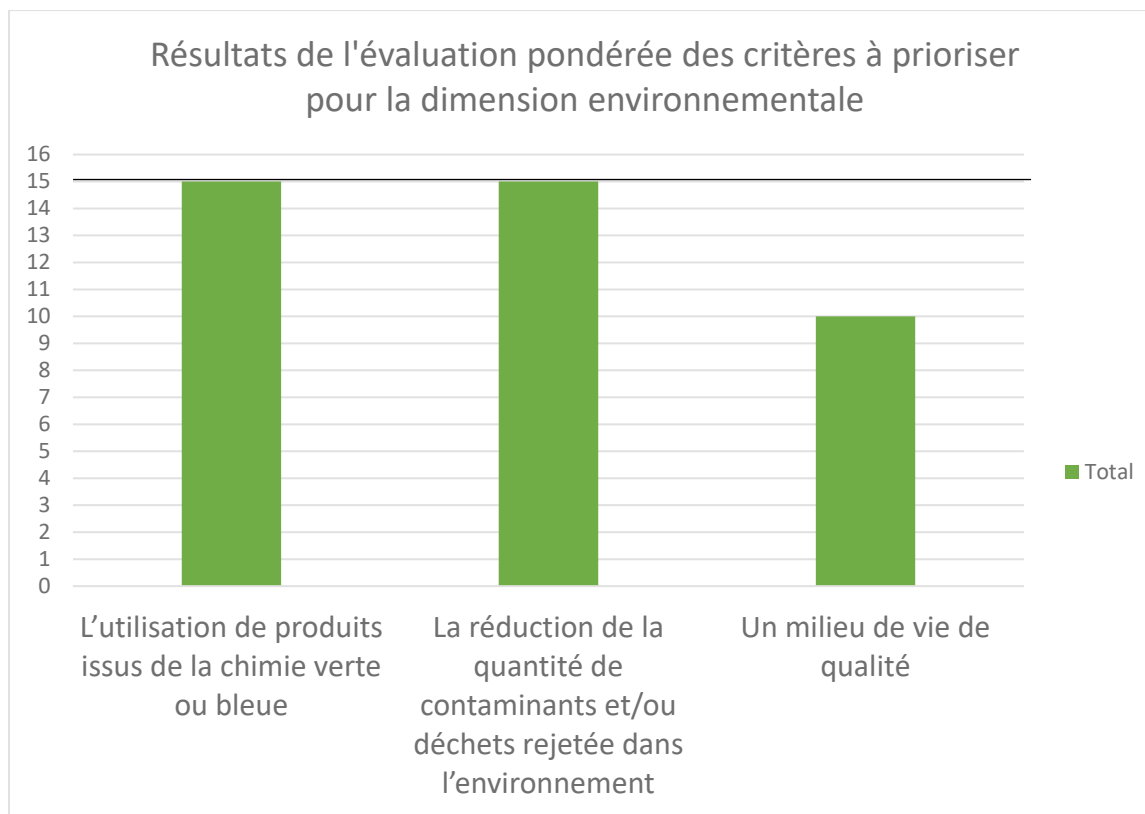


**Figure 7.2 Analyse du respect des exigences minimales de durabilité pour la conception biomimétique du traitement des eaux usées**

En observant la figure 7.2, il est possible d'affirmer que pour la dimension environnementale, les résultats surpassent les requis de 10 points. La démarche de conception est donc considérée suffisamment efficace sur le plan environnemental. En ce qui concerne la dimension sociale, il existe un écart négatif de 10 points entre les requis et le résultat c'est-à-dire que le résultat est inférieur de 10 points à l'exigence minimale de la dimension sociale fixée à 25 points. Ainsi, la démarche de conception d'un point de vue sociale nécessite un ajustement. Enfin, sur le plan économique, les résultats de la démarche de conception n'ont pas atteint le seuil de réussite. En effet, une augmentation de 47 % des points serait nécessaire pour atteindre l'exigence. Des modifications importantes devront être amenées à la démarche de conception d'un point de vue économique, comme il s'agit de la dimension ayant obtenu la plus faible performance face aux exigences minimales en matière de durabilité.

Afin de déterminer les pistes de bonifications à prioriser, les résultats des critères qui avaient obtenu une pondération de 5 (critère important et prioritaire) ont davantage été analysés. Pour être acceptables, les critères ayant une pondération de 5 doivent nécessairement avoir obtenu un résultat de 2 ou 3 pour un total de 10 ou 15 points respectivement par critère. Sans l'atteinte de cette performance, des améliorations de la démarche de conception seront requises. Néanmoins, pour les critères ayant un résultat de 2, il faudra considérer une amélioration de certains aspects de la démarche étant donné l'importance et la priorité de ces critères. En ce qui concerne les critères pondérés à 5 et ayant une évaluation de 1, ils devront nécessairement être considérés et des modifications à la démarche devront être apportées. La figure 7.3 illustre l'évaluation pondérée (pondération x évaluation) des trois critères de la dimension environnementale ayant été pondérés à 5.

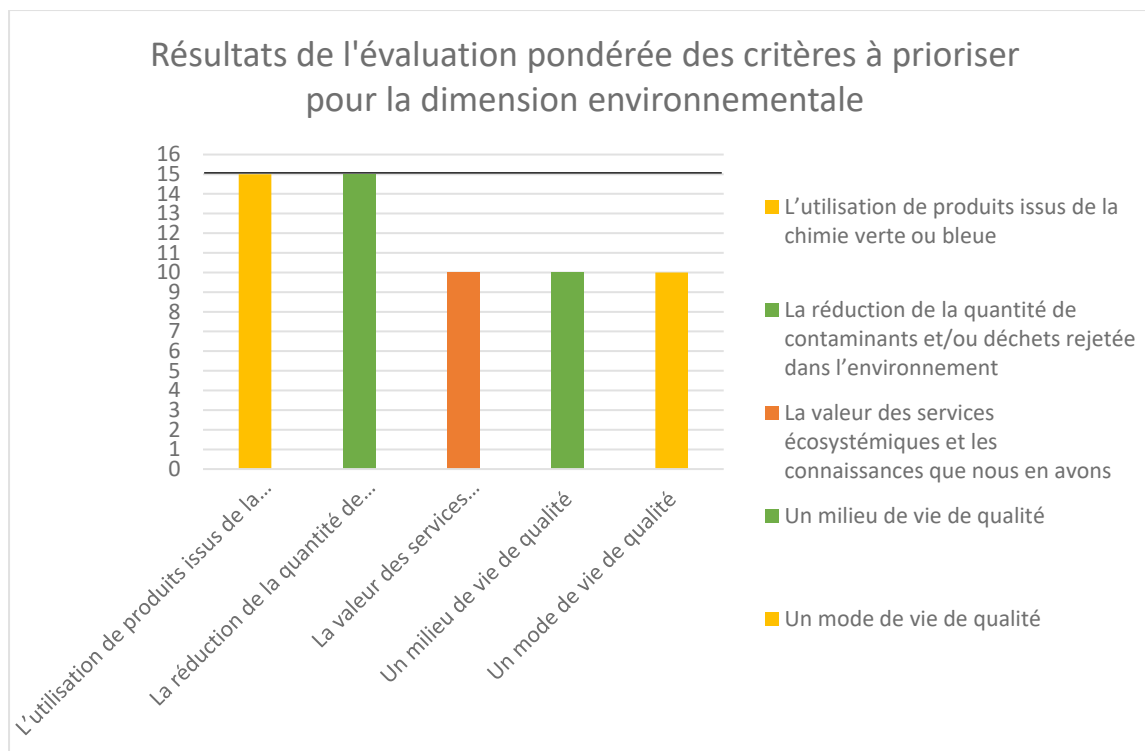
Il est possible de constater que les deux premiers critères (utilisation de produits issus de la chimie verte ou bleue et réduction de la quantité de contaminants et/ou déchets rejetée dans l'environnement) ont obtenu une évaluation pondérée de 15, soit le maximum de points possibles. Ainsi, aucune amélioration ne s'avère nécessaire pour ces critères. À l'égard du dernier critère (milieu de vie de qualité), il a obtenu une pondération évaluée de 10, signifiant que l'évaluation du critère a été de 2. Par conséquent, certains aspects de la démarche en lien avec ce critère devront être revus pour augmenter la durabilité de cette démarche.



**Figure 7.3 Résultats de l'évaluation pondérée des critères pondérés à 5 pour la dimension environnementale**

Le même exercice d'analyse de l'évaluation pondérée des critères ayant été pondéré à 5 a été réalisé pour l'ensemble des dimensions afin d'avoir une vision globale des pistes de bonifications à prioriser. La figure 7.4 présente les résultats de cette analyse.

L'analyse du graphique de la figure 7.4 permet d'affirmer que les critères de la dimension environnementale furent principalement pondérés comme importants et prioritaires comparativement aux autres dimensions. Les deux critères des dimensions sociale et économique ont obtenu une pondération évaluée de 10, signifiant que l'évaluation des critères a été de 2. Ceci implique une révision de la démarche de conception pour pouvoir atteindre la durabilité.



**Figure 7.4 Résultats de l'évaluation pondérée des critères pondérés à 5 pour les trois dimensions**

Globalement, la démarche de conception est durable d'un point de vue environnemental, mais requiert plusieurs modifications pour l'être dans les dimensions sociale et économique. Pour ces motifs, des pistes de bonifications devraient être apportées et une deuxième analyse pourrait avoir lieu.

### 7.3.2 Pistes de bonifications

Des pistes de bonifications ont été ciblées au tableau 7.3 pour les critères n'ayant pas eu une évaluation pondérée maximale. Certaines de ces pistes sont davantage explorées ci-après.

D'abord, dans la dimension environnementale, une piste de bonification, commune aux critères de maintien de la biodiversité et du milieu et mode de vie de qualité, a été soulevée, soit de développer le système de traitement à l'extérieur. En effet, le prototype a été conçu pour être opéré à l'intérieur d'un bâtiment considérant les conditions climatiques difficiles du Québec. L'établissement du système à l'extérieur et l'adaptation à ces dites conditions permettraient de favoriser un habitat naturel pour plusieurs espèces, notamment celles qui voient leurs habitats détruits en milieu urbain. La destruction d'habitat, pour répondre aux besoins anthropiques, est un des enjeux principaux de la perte de biodiversité (Espace pour la vie Montréal, s. d.). De plus, advenant le cas où le système est localisé en zone urbaine, il est favorable de créer des aires naturelles dans ce type de zone pour améliorer le milieu de vie



et le mode de vie de la population. Un tel aménagement favorise l'esthétique du milieu, la tranquillité et assure un développement sain pour la population et les espèces. (Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2012) Néanmoins, l'espace nécessaire pour ce type d'installation en zone urbaine est à prendre en considération et des mesures de prévention d'émissions d'odeurs nuisibles seront nécessaires.

Dans l'étude de cas, les bassins du prototype sont achetés auprès d'un fournisseur et sont préalablement fabriqués avant leur livraison à partir de polymères. Tel que suggéré dans les pistes de bonifications de la dimension environnementale, l'emphase pourrait être portée sur l'achat ou la fabrication de bassins avec des matériaux recyclés. De plus, ces matériaux pourraient être locaux, selon la description de ce critère, ce qui permettrait notamment d'y répondre. Du fait qu'une nouvelle extraction de matières et le transport de celles-ci ne seraient plus nécessaires, une réduction des émissions de gaz à effet de serre et une augmentation de l'efficacité énergétique du processus seraient possibles. La démarche de conception serait également orientée vers une économie dite circulaire, puisqu'il y aurait un bouclage des flux et l'achat de produits durables. Afin de maximiser les bienfaits d'une économie circulaire, dans la démarche de conception biomimétique du traitement des eaux, une symbiose industrielle avec des industries à proximité pourrait être réalisée. Ainsi, il y aurait possibilité de se procurer des matériaux recyclés provenant de leurs procédés pour fabriquer les bassins. Les matériaux du procédé de traitement des eaux usées bio-inspiré pourraient également servir aux autres industries lorsqu'ils approchent la fin de leur vie dans le cycle du traitement.

D'autre part, l'eau est amenée des canalisations au premier bassin de traitement à l'aide d'une pompe alimentée aux combustibles fossiles. Dans une optique de réduction d'émissions de GES et d'efficacité énergétique, la pompe pourrait être alimentée par des énergies renouvelables. Au Québec, l'hydroélectricité est une énergie renouvelable efficace pouvant être utilisée dans la démarche de conception. Il serait également possible de complètement modifier le prototype afin que l'écoulement dans les bassins se fasse de façon gravitaire, mais ce modèle augmenterait l'empreinte au sol. Un écoulement gravitaire peut également s'avérer complexe s'il n'y a pas un dénivelé naturel à l'endroit de réception des eaux usées.

Au regard des pistes de bonifications pour la dimension sociale, l'optimisation de l'aménagement des lieux a été suggérée afin d'offrir aux employés une meilleure qualité de vie. À titre d'exemple, une salle de détente ou de lecture pourrait être aménagée, ainsi que des bureaux modulaires pour permettre aux employés de travailler assis et debout. Une autre des pistes de bonification mentionne la possibilité de sensibiliser et informer les employés aux bienfaits d'un mode de vie équilibré. Ce qui est entendu par

« équilibré » est une juste répartition du temps entre les loisirs, le sport, la famille et le travail. À cet effet, l’employeur du centre de traitement doit consentir à l’employé un horaire qui lui permet de concilier ces éléments.

Enfin, une dernière piste de bonification qui mérite d’être davantage développée a trait au rôle de la population dans la protection des écosystèmes et des espèces. Les concepteurs peuvent promouvoir auprès de la population les actions qu’elle peut mettre de l’avant pour protéger les écosystèmes, à l’aide d’une visite du site. Ces actions sont notamment :

- S’informer sur les espèces à statut précaire
- Prévenir les autorités locales de la présence de ces espèces
- Cultiver un jardin avec des espèces indigènes
- Créer des habitats naturels
- Participer ou organiser des activités de nettoyage de milieux naturels
- Réduire l’empreinte écologique
- Acheter des produits locaux

#### **7.4 Limites de l’outil**

À la lumière de l’analyse qui a été réalisée sur la durabilité de la démarche de conception d’un système de traitement des eaux usées bio-inspiré, il a été possible de constater que l’outil présente quelques limites. D’une part, les critères sociaux et économiques sont moins exhaustifs que ceux qui sont environnementaux, ceci s’explique par le fait que l’intégration d’aspects sociaux ou économiques à une innovation technologique peut s’avérer un défi. Ainsi, le bassin d’idées de conception environnementalement durables est plus vaste que celui des deux autres dimensions du développement durable. En effet, le tableau à l’Annexe 1 présente davantage d’exemples de pratiques et d’actions pour les critères environnementaux, ce qui facilite l’intégration de ces critères à la démarche.

De plus, dans une optique où tous les critères devraient être intégrés à la démarche de conception, l’outil peut laisser suggérer que la dimension environnementale est davantage importante que les deux autres, car elle comporte plus de critères, soit dix critères environnementaux, comparativement à cinq critères

sociaux et six critères économiques. Ensuite, si tous les critères en environnement sont pondérés à 5 et qu'ils sont tous intégrés dans la démarche, ils seront donc évalués à 3. Par conséquent, le pointage total de l'outil serait de 150, ce qui est déjà pratiquement la moitié des points pour obtenir le pointage maximal de 315. La conception pourrait alors être jugée suffisamment durable et les deux autres dimensions ne nécessiteraient que l'atteinte d'exigences minimales.

Par ailleurs, le choix des valeurs nominales pour la pondération des critères est un processus très subjectif, surtout si cette étape est réalisée par les mêmes personnes qui font l'évaluation des critères. En effet, l'évaluateur est juge et partie dans une telle situation. En outre, l'utilisation de l'outil nécessite des connaissances et une expertise relativement poussée en développement durable et en biomimétisme, car les notions sont complexes et multiples.

Enfin, l'analyse de la durabilité demande de quantifier et de comparer des critères qui sont qualitatifs plutôt que quantitatifs. Il est en effet question de déterminer sur une échelle de 1 à 3 si des éléments ou tous les éléments de la démarche de conception permettent de répondre au critère, par exemple, de consommation responsable. Néanmoins, ce concept est difficilement quantifiable et il peut être complexe de mettre le doigt sur les éléments de la démarche qui favoriseront la consommation responsable.

## **8. RECOMMANDATIONS**

La présente section fait état de recommandations afin de compléter la démarche de conception proposée dans la norme ISO 18458, de tendre vers l'atteinte de la durabilité en ce qui concerne la démarche de conception bio-inspirée, de développer les connaissances sur le concept du biomimétisme et d'en faire la promotion sur la scène d'innovation pour le développement durable.

### **8.1 Prendre en compte les dix principes du biomimétisme dans la démarche de conception biomimétique présentée dans la norme ISO 18458**

Bien que la norme ISO 18458 exprime certains éléments qui favorisent une démarche de conception biomimétique plus durable, elle ne fait aucune référence aux dix principes du biomimétisme, ou principes du vivant tel que présentés par le Biomimicry Institute. Ces principes sont inhérents au fonctionnement des systèmes biologiques et comme il a été possible de le constater au travers de ce document, ils assurent une orientation durable de la démarche d'innovation. Il serait donc essentiel de ne pas dissocier le concept du biomimétisme de la démarche de conception biomimétique. Ainsi, une étape supplémentaire ou adjacente aux trois étapes de la démarche à suivre dans la norme devrait être ajoutée; prendre en compte et intégrer les principes du vivant dans le développement du concept.

### **8.2 Investir dans la recherche et le développement pour l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques**

À ce jour, la principale source d'information concernant les systèmes biologiques est la plateforme « Asknature ». Les idées de conceptions des experts sont donc dépendantes et limitées aux informations qui se trouvent sur ce site internet. Dans le cas où ce site ne serait plus accessible, la montée de l'utilisation du concept serait difficilement possible. De plus, le site est uniquement en anglais, ce qui peut s'avérer une barrière pour certains. Il est donc suggéré d'investir au Québec dans la recherche et le développement qui permettrait d'analyser et de collecter de l'information sur les fonctions, les formes, les matériaux et procédés des systèmes biologiques, ainsi que sur les écosystèmes. Une analyse des systèmes biologiques québécois/canadien permettrait d'offrir une innovation adaptée au contexte de la province, voire du pays. De plus, elle permettrait de faire avancer la démarche de développement durable, notamment par l'entremise d'approvisionnement local à la suite d'une connaissance approfondie des ressources disponibles au Canada. Les résultats de ces recherches pourraient ensuite être accessibles via une plateforme de partage.

### **8.3 Développer des plateformes québécoises de collaboration et de partage d'informations sur le biomimétisme**

Le concept, étant encore relativement nouveau et peu utilisé au Québec, une plateforme de partage pourrait permettre de rassembler les initiatives internationales et nationales dans le domaine, ainsi que les informations sur les systèmes biologiques. Elle pourrait permettre de répondre aux questionnements possibles des différents experts dans le processus de développement d'innovations bio-inspirées. De plus, les experts de différents domaines pourraient échanger sur le sujet et collaborer conjointement sur des projets d'innovations qui les intéressent. Il est à noter que l'institut de biomimétisme avait comme objectif premier de devenir un pôle de rassemblement pour les acteurs du biomimétisme, mais fait seulement office à ce jour d'un site de formation, de conseils et d'informations.

### **8.4 Allouer une période de temps dans la démarche de conception pour l'analyse des différentes avenues de conception**

Il a été mentionné précédemment que durant le développement d'innovations, des limites de conception des paramètres à développer du système étaient préalablement définies, notamment en raison du manque de temps. Il serait donc judicieux d'allouer une période de temps considérable pour réaliser une analyse approfondie de toutes les avenues de développement possibles du système et prendre en considération tous les paramètres (ex. : interrelations entre les variables). Cette période permettrait de développer une conception qui prend en compte le contexte de développement et donc facilite la mise en œuvre du développement durable. Elle permettrait aussi d'être davantage analogue au système biologique, puisque ce sont des systèmes complexes qui nécessitent une analyse de conception poussée qui intègre toutes les variables.

### **8.5 Développer des indicateurs permettant d'identifier les avantages d'une approche de développement basée sur le biomimétisme pour le développement durable**

Mis à part les dix principes du concept de biomimétisme, il n'existe aucune balise pour déterminer quels seraient les avantages d'utiliser une approche de conception bio-inspirée pour promouvoir le développement durable et innover en ce sens. Au même titre que les critères élaborés dans l'outil, des indicateurs permettant d'identifier les éléments durables de ce type d'approche et les avantages à l'utiliser pourraient être créés. Ces indicateurs permettraient possiblement d'anticiper les retombées économiques et donc de favoriser les investissements dans le domaine.

## CONCLUSION

Les stratégies d'adaptation du vivant ont permis d'élaborer les dix principes fondamentaux du concept de biomimétisme, notamment en ce qui a trait à une utilisation consciencieuse des ressources et de l'énergie, ainsi qu'à l'utilisation d'une chimie verte. En intégrant ces principes à la méthode de conception d'innovations bio-inspirées, elle présente une meilleure performance environnementale et s'inscrit dans une démarche de développement durable.

L'objectif général de cet essai, qui était d'analyser si la démarche de conception biomimétique, basée sur la norme ISO 18458, permet d'atteindre la durabilité, a pu être répondu grâce à la création d'un outil. Par le fait même, un des objectifs spécifiques, qui se voulait de développer un outil pour valider la durabilité des conceptions biomimétiques a également été atteint. Le contenant et une partie du contenu de l'outil furent inspirés de la Boussole Bernoise, de la grille d'analyse de développement durable de l'UQAC et de la grille de cadrage du MDEP.

Par la suite, il a été possible d'établir des liens entre les principes du biomimétisme et ceux de la Loi sur le développement durable du Québec, ce qui répondait à un autre objectif spécifique. Ces liens ont permis de concevoir des critères qui intègrent les deux types de principes et qui, de ce fait, sont concis et précis facilitant subséquemment leur insertion dans la démarche de conception.

Le dernier objectif spécifique a également été atteint, car l'élaboration d'une étude de cas fictif a permis de démontrer la pertinence de l'outil. La démarche de conception de cette dernière fut basée sur la norme ISO 18458, suivant ainsi une méthodologie rigoureuse et internationalement reconnue. Ceci permet donc de reproduire la démarche d'analyse de la durabilité pour comparer, entre elles, des démarches de conception analogues pour des innovations similaires. Étant donné que l'efficacité des systèmes de traitement des eaux usées est un enjeu majeur au Québec, une conception bio-inspirée d'un système de traitement d'eaux usées, permettant d'éliminer des polluants émergents, fut élaborée pour l'étude de cas fictif. En effet, les polluants émergents ne sont présentement pas traités par les stations d'épuration et se retrouvent dans les milieux naturels, entraînant des impacts néfastes pour ces milieux. En raison de la nouveauté du concept au Québec et de son utilisation peu fréquente pour le développement d'innovations durables, il n'a pas été possible de tester une démarche de conception concrète à l'aide de l'outil.

À la lumière de l'analyse de la durabilité de la démarche de conception, il est possible d'affirmer que l'outil présente quelques limites. D'abord, la dimension environnementale dénombre davantage de critères que les dimensions économique et sociale. C'est la difficulté à concevoir des critères sociaux et économiques

applicables à une innovation technologique qui peut expliquer cette inégalité de critères. Comme la dimension environnementale présente plus de critères, une atteinte suffisante de points dans cette dimension mènera possiblement le concepteur à ne viser que les exigences minimales de durabilité préétablies dans les deux autres dimensions. De plus, le processus de détermination des valeurs nominales pour la pondération des critères est très subjectif, puisque l'évaluateur est à la fois juge et partie.

Dans l'optique de faire connaître le concept de biomimétisme au Québec et de guider les méthodes de développement d'innovations durables vers des démarches de conceptions bio-inspirées durables, des recommandations ont été faites. Entre autres, les dix principes du biomimétisme devraient être pris en compte dans la démarche de conception biomimétique présentée dans la norme ISO 18458. Ensuite, au Québec, des investissements importants devraient être réalisés dans la recherche et le développement afin de collecter de l'information sur les systèmes biologiques et ne plus dépendre de sources d'informations externes. La réalisation de cette collecte d'informations mène à recommander également que des plateformes québécoises de collaboration et de partage d'informations sur le biomimétisme soient développées. Par ailleurs, il serait pertinent de développer des indicateurs permettant d'identifier les avantages d'une approche de conception basée sur le biomimétisme pour le développement durable. En ce sens, les retombées économiques de ces innovations pourraient être estimées et les investissements dans le domaine justifiés. Enfin, une période de temps pourrait être allouée lors de la démarche de conception pour considérer tous les paramètres de conception.

Le manque de sources d'informations sur les démarches de conceptions biomimétiques au Québec et le manque de temps pour entreprendre des démarches auprès de concepteurs dans le domaine n'ont pas permis d'analyser, à l'aide de l'outil créé, une démarche concrète. Il serait donc pertinent que l'outil soit testé sur un projet de conception réelle. Il serait également intéressant de réaliser une analyse comparative de la durabilité d'une démarche de conception non biomimétique et d'une qui est biomimétique pour le même type de produit.

Pour obtenir l'outil et davantage d'informations sur son mode de fonctionnement, veuillez communiquer avec la personne concernée à cette adresse courriel : [valerie.desormeaux@usherbrooke.ca](mailto:valerie.desormeaux@usherbrooke.ca)

## LISTE DE RÉFÉRENCES

- Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME). (2019). Économie circulaire. Repéré à <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>
- Berryman, D., Rondeau, M. et Trudeau, V. (2014). *Amélioration de la qualité de l'eau : concentrations de médicaments, d'hormones et de quelques autres contaminants d'intérêt émergent dans le Saint-Laurent et dans trois de ses tributaires*. Repéré à [http://planstlaurent.qc.ca/fileadmin/publications/Resultats\\_2011-2016/Qualite\\_eau/10\\_1\\_2/Fiche\\_qualite\\_de\\_l\\_eau\\_fr\\_2015.pdf](http://planstlaurent.qc.ca/fileadmin/publications/Resultats_2011-2016/Qualite_eau/10_1_2/Fiche_qualite_de_l_eau_fr_2015.pdf)
- Biomimicry Institute. (2020). Janine Benyus. Repéré à <https://biomimicry.org/janine-benyus/>
- Biomimicry Institute. (s. d.a). Function and strategy. Repéré à <https://toolbox.biomimicry.org/core-concepts/function-and-strategy/>
- Biomimicry Institute. (s. d.b). Nature's unifying patterns: 10 lessons to consider every time you design something. Repéré à <https://toolbox.biomimicry.org/core-concepts/natures-unifying-patterns/>
- Bœuf, G. (2014). Biomimétisme et bio-inspiration. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-vraiment-durable-2014-1-page-43.htm>
- Bonnet, P. (2018). Quels sont les 5 règnes du vivant? Repéré à <https://www.planeteanimal.com/quels-sont-les-5-regnes-du-vivant-2325.html>
- Caron, S. et Morin, H. (2015). Économie et externalité : les profits et les pertes dont on ne parle pas. Repéré à <https://iris-recherche.qc.ca/blogue/economie-et-externalites-les-profits-et-les-pertes-dont-on-ne-parle-pas>
- Chalcraft, E. (2012). Biomimicry Shoe by Marieka Ratsma and Kostika Spaho. Repéré à <https://www.dezeen.com/2012/07/17/biomimicry-shoe-by-marieka-ratsma-and-kostika-spaho/>
- Chantier de l'économie sociale. (2019). Découvrez l'économie sociale. Repéré à <https://chantier.qc.ca/decouvrez-leconomie-sociale/definition/>
- Commissariat général au développement durable. (2012). *Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers*. Repéré à [http://ceebios.com/wp-content/uploads/2017/06/2012\\_ED72-biomim%C3%A9tisme.pdf](http://ceebios.com/wp-content/uploads/2017/06/2012_ED72-biomim%C3%A9tisme.pdf)
- Conseil du patronat du Québec (CPQ). (2018). *De l'achat et de l'approvisionnement local au Québec : initiatives, politiques et retombées économiques*. Repéré à <https://www.cpq.qc.ca/workspace/uploads/files/achat-et-approvisionnement-local-au-quebec.pdf>
- Creiser, C. (2008). Le biomimétisme est-il l'avenir du développement durable? Repéré à <http://www.pourlasolidarite.eu/fr/publication/le-biomimetisme-est-il-lavenir-du-developpement-durable>
- Davies, N. (2014). Mother nature, designer. *Planning; Chicago*. 80 (3), 13-17.



- De Champlain, M., Drogui K., P. et Van Coillie, R. (2013). *Les effluents municipaux : une source importante de rejet d'hormones dans le milieu aquatique*. Repéré à [https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Ouvrages\\_de\\_reference/Art\\_Technique\\_Effluents\\_municipaux-Mars\\_2013.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Ouvrages_de_reference/Art_Technique_Effluents_municipaux-Mars_2013.pdf)
- De Pauw, I.C., Kandachar, P. et Karana, E. (2017). Assessing sustainability in nature-inspired design. Repéré à <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19397038.2014.977373>
- Dussol, B. (2016). Le marché de Royan fête son sixantième anniversaire. Repéré à <https://France3-regions.francetvinfo.fr/nouvelle-aquitaine/charente-maritime/royan/le-marche-de-royan-fete-son-soixantieme-anniversaire-949131.html>
- Elmeligy, D.A. (2016). *Biomimicry for ecologically sustainable design in architecture: A proposed methodological study*. Repéré à <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/ARC16/ARC16005FU1.pdf>
- Espace pour la vie Montréal. (s. d.). Destruction des habitats. Repéré à <https://espacepurlavie.ca/destruction-des-habitats>
- FactoryFuture. (2019). Comment réduire la consommation énergétique dans l'industrie? Repéré à <https://www.factoryfuture.fr/reduire-consommation-energetique-industrie/>
- Gabillot, C. (2017). Le biomimétisme, un outil de développement durable? Repéré à <https://www.gaiapresse.ca/2017/03/le-biomimetisme-un-outil-de-developpement-durable/>
- Gouvernement du Canada. (2017a). Définition de la toxicité. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-environnemental-loi-canadienne-protection/listes-substances/definition-toxicite.html>
- Gouvernement du Canada. (2017b). Stratégie ministérielle de développement durable 2017-2020. Repéré à [https://www.ic.gc.ca/eic/site/sd-dd.nsf/fra/h\\_sd00624.html](https://www.ic.gc.ca/eic/site/sd-dd.nsf/fra/h_sd00624.html)
- Gouvernement du Québec. (2004). Plan de développement durable du Québec. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/publications/2004/ENV20040329.htm>
- Gouvernement du Québec. (2019). Saines habitudes de vie. Repéré à <https://www.quebec.ca/sante/conseils-et-prevention/saines-habitudes-de-vie/>
- Guespin-Michel, J. (2016). *La révolution du complexe : science, dialectique et rationalité*. Repéré à <http://www.revolutionducomplexe.fr/images/downloads/revolutionducomplexeguespin.pdf>
- Institut de biomimétisme. (2020). Apprendre les bases. Repéré à <https://biomimetisme.ca/ce-quest-le-biomimetisme/apprendre/>
- Institut de développement de produits. (2018). Les Québécois et la consommation responsable : portrait. Repéré à <https://www.idp-innovation.com/les-quebecois-et-la-consommation-responsable-portrait/>
- John Todd Ecological Design. (s. d.a). *Omega Center for Sustainable Living Eco-Machine*. Repéré à [https://docs.wixstatic.com/ugd/eed291\\_bb5a615b387a457da47306cc1538c3b9.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/eed291_bb5a615b387a457da47306cc1538c3b9.pdf)
- John Todd Ecological Design. (s. d.b). Who we are. Repéré à <https://www.toddecological.com/about>

- Kinnard, N. (2016). Une eau encore bonne à boire? Repéré à <https://www.quebecscience.qc.ca/sante/une-eau-encore-bonne-a-boire/>
- Larousse. (s. d.a) Absorption. Repéré à <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/absorption/285?q=absorption#275>
- Larousse. (s. d.b) Adsorption. Repéré à <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/absorption/285?q=absorption#275>
- Loi sur le développement durable*, L.R.Q., c. D-8.1.1
- Lozeva, S. (2009). Questioning the theory and practice of biomimicry. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/235990489\\_Questioning\\_the\\_theory\\_and\\_practice\\_of\\_biomimicry](https://www.researchgate.net/publication/235990489_Questioning_the_theory_and_practice_of_biomimicry)
- M. Benyus, J. (2002). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. Rue de l'échiquier.
- Maltais-Guilbault, M. (2011). *L'écologie industrielle au Québec : identification de pistes pour développer ce modèle d'innovation pour les entreprises* (Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada). Repéré à [https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essa is2011/Maltais-Guilbault\\_M\\_\\_11-12-2011\\_.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essa is2011/Maltais-Guilbault_M__11-12-2011_.pdf)
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2019). Terres rares : propriétés, usages et types de gisement. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/metaux/metaux-proprietes-terres-rares.jsp>
- Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario. (2012). *La biodiversité, c'est dans notre nature : plan du gouvernement de l'Ontario pour conserver la biodiversité : 2012-2020*. Repéré à [https://files.ontario.ca/mnr\\_biion\\_accessibility\\_fr\\_final.pdf](https://files.ontario.ca/mnr_biion_accessibility_fr_final.pdf)
- Mirniazmandan, S. et Rahimianzarif, E. (2017). Biomimicry, An Approach Toward Sustainability of High-Rise Buildings. Repéré à <https://www.omicsonline.org/open-access/biomimicry-an-approach-toward-sustainability-of-highrise-buildings-2168-9717-1000203.php?aid=92856>
- Mots Avec*. (2015). *Définition de décyclage*. Repéré à <https://motsavec.fr/definition/d%C3%A9cyclage>
- Observatoire de la Consommation Responsable (OCR). (2018). Baromètre de la consommation responsable. Repéré à <https://ocresponsable.com/barometre-de-la-consommation-responsable-edition-2018/>
- Office de la coordination environnementale et de l'énergie [OCEE] du canton de Berne. (2008). *La boussole bernoise du développement durable : guide*. Repéré à [https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/298919/mod\\_resource/content/1/Boussole%20bernoise.pdf](https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/298919/mod_resource/content/1/Boussole%20bernoise.pdf)
- Olivier, M. J. (2012). *Chimie de l'environnement* (8<sup>e</sup> éd.). Longueuil, Québec : Lab Éditions.
- Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). (2017). Les douze principes de la chimie verte. Repéré à <http://www.unesco.org/new/fr/natural->

sciences/science-technology/basic-sciences/chemistry/green-chemistry-for-life/twelve-principles-of-green-chemistry/

Organisation internationale de normalisation (ISO). (2015). *Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologie*. Norme internationale ISO 18458. Genève, Suisse.

Paris Innovation Review. (2012). Le biomimétisme ou l'art de l'innovation durable. Repéré à <http://parisinnovationreview.com/article/le-biomimetisme-ou-lart-de-linnovation-durable>

Pineau, P.-O., Gauthier, P., Whitmore, J., Normandin, D., Beaudoin, L. et Beaulieu, J. (2019). *Portrait et pistes de réduction des émissions industrielles de gaz à effet de serre au Québec : volet 1 - Projet de recherche sur le potentiel de l'économie circulaire sur la réduction de gaz à effet de serre des émetteurs industriels québécois*. Repéré à [http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2019/09/GESIndQc2019-Volet1\\_Web.pdf](http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2019/09/GESIndQc2019-Volet1_Web.pdf)

Rao, R. (2014). *Biomimicry in architecture*. Repéré à [http://www.isrjournals.org/journals/civil\\_environmental\\_journals/biomimicryinarchitecture140273613.pdf](http://www.isrjournals.org/journals/civil_environmental_journals/biomimicryinarchitecture140273613.pdf)

Revenu Québec. (2018). Économie collaborative (ou économie de partage). Repéré à <https://www.revenuquebec.ca/fr/juste-pour-tous/vous-aider-a-vous-conformer/economie-collaborative/>

Ricard, P. (2015). *Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement*. Repéré à <https://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/154000667.pdf>

Riffon, O. et Tremblay D. (2016). *Comment réaliser une analyse de développement durable? : guide d'utilisation de la Grille d'analyse de développement durable*. Repéré à [http://ecoconseil.uqac.ca/wp-content/uploads/2017/04/Guide\\_utilisation\\_GADD\\_2016\\_SM.pdf](http://ecoconseil.uqac.ca/wp-content/uploads/2017/04/Guide_utilisation_GADD_2016_SM.pdf)

Schreiner, W. (s. d.). Biomimicry: A history. Repéré à <https://ehistory.osu.edu/exhibitions/biomimicry-a-history>

Scobey-Thal, J. (2014). Biomimetics: A short history. Repéré à <https://foreignpolicy.com/2014/12/01/biomimetics-a-short-history/>

Société canadienne du cancer. (2020). Le système endocrinien et ses hormones. Repéré à <http://www.cancer.ca/fr-ca/cancer-information/cancer-101/what-is-cancer/the-endocrine-system-and-hormones/?region=qc>

Stoppa, M. (2013). *Biomimetic and sustainable design: A virtuous relationship*. Repéré à <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/ECO13/ECO13021FU1.pdf>

Termium. (2016). Éco-efficacité. Repéré à [https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=ECO-EFFICACITE&index=alt&codom2nd\\_wet=SL#resultrecs](https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=ECO-EFFICACITE&index=alt&codom2nd_wet=SL#resultrecs)

The Biomimicry Institute. (2018a). Eco-Machine wastewater management: John Todd Ecological Design, Inc. Repéré à <https://asknature.org/idea/eco-machine-wastewater-management/#.XdcUgldKjIU>

The Biomimicry Institute. (2018b). Metabolic and oxidation processes break down hydrocarbons: Mushrooms, Sac Fungi, Lichens, Yeast, Molds, Rusts, etc. Repéré à <https://asknature.org/strategy/metabolic-and-oxidation-processes-break-down-hydrocarbons/#.Xdmm1uhKjIU>

The Biomimicry Institute. (2018c). Mucus filters trap particles smaller than mesh size: Pegea confoederata. Repéré à <https://asknature.org/strategy/mucus-filters-trap-particles-smaller-than-mesh-size/#.Xd28AOhKjIU>

Ville de Montréal. (2016). Montréal durable 2016-2020. Repéré à [https://ville.montreal.qc.ca/portal/page?\\_pageid=7017,70777573&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](https://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7017,70777573&_dad=portal&_schema=PORTAL)

Ville de Montréal. (s. d.) Traitements. Repéré à [http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?\\_pageid=6497,54223581&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6497,54223581&_dad=portal&_schema=PORTAL)

## **BIBLIOGRAPHIE**

Ingénieurs Canada. 2016. Guide national sur le développement durable et la gérance environnementale à l'intention des ingénieurs. Repéré à <https://engineerscanada.ca/fr/publications/guide-national-sur-le-developpement-durable-et-la-gerance-environnementale#-les-dix-directives>

## ANNEXE 1 – EXEMPLES DE PRATIQUES ET ACTIONS PAR CRITÈRE POUR ATTEINDRE LA DURABILITÉ DANS LA DÉMARCHE DE CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE

**Tableau Exemples de pratiques et actions par critère pour atteindre la durabilité dans la démarche de conception biomimétique**

(inspiré de Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie [ADEME], 2019, Caron et Morin, 2015, Chantier de l'économie sociale, 2019, Conseil du patronat du Québec [CPQ], 2018, *FactoryFuture*, 2019, Gouvernement du Québec, 2019, Maltais-Guilbault, 2011, Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2012, Gouvernement du Québec, 2004), Observatoire de la Consommation Responsable [OCR], 2018, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture [UNESCO], 2017, Pineau et al., 2019, Revenu Québec, 2018)

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
Environnementale	Maintien de la biodiversité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Créer des aires protégées</li> <li>• Protéger des écosystèmes, des espèces et leurs habitats, particulièrement ceux à statut précaire</li> <li>• Restaurer des écosystèmes</li> <li>• Créer des milieux naturels en zone urbaine</li> <li>• Utiliser des espèces endémiques et/ou indigènes</li> <li>• Réduire la menace des espèces envahissantes</li> <li>• Assurer une bonne qualité de l'eau</li> </ul>	Préservation de la biodiversité	S. O.
	Réduction de la quantité de contaminants et/ou déchets rejetée dans l'environnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliser des procédés propres</li> <li>• Améliorer les procédés</li> <li>• Faire la maintenance des équipements de production</li> <li>• Appliquer des mesures de gestion de rejets à l'environnement</li> <li>• Avoir un plan de gestion de déchets non dangereux et dangereux</li> </ul>	Santé et qualité de vie Protection de l'environnement Production et consommation responsables	S. O.

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliser des produits biologiques et/ou biodégradables</li> </ul>		
	Utilisation parcimonieuse des ressources renouvelables et non renouvelables	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faire une analyse de cycle de vie des ressources utilisées</li> <li>Réduire l'utilisation de ressources non renouvelables</li> <li>Réutiliser les ressources</li> <li>Optimiser l'utilisation des ressources</li> </ul>	Protection de l'environnement Préservation de la biodiversité Respect de la capacité de support des écosystèmes Production et consommation responsables	La nature optimise plutôt que maximise La nature utilise les ressources rares et matériaux avec parcimonie La nature maintient un équilibre avec la biosphère
	Approvisionnement local	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acquérir et utiliser des matériaux et/ou ressources provenant du lieu de création de la conception ou à 800 km et moins de celui-ci</li> </ul>	Production et consommation responsables	La nature s'approvisionne localement
	Réutilisation ou valorisation des matières résiduelles, des ressources, des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faire une analyse de cycle de vie de la conception</li> <li>Évaluer les possibilités de réutilisation ou valorisation pour chaque matière résiduelle, ressource, matériau</li> <li>Développer une symbiose industrielle</li> </ul>	Production et consommation responsables Respect de la capacité de support des écosystèmes	La nature exploite les déchets comme ressources
	Utilisation de produits issus de la chimie verte ou bleue	<ul style="list-style-type: none"> <li>Supprimer ou réduire l'utilisation de substances auxiliaires et de solvants toxiques</li> <li>Développer des méthodes de synthèse qui permettent d'utiliser et produire des substances à peine</li> </ul>	Santé et qualité de vie Protection de l'environnement Production et consommation responsables	La nature utilise une chimie et des matériaux qui sont sans danger pour les êtres vivants

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
		<p>ou non toxiques pour la nature et l'humain</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réaliser la synthèse des substances dans des conditions de température et de pression ambiantes</li> <li>• Utiliser des molécules organiques (sels, minéraux, dioxyde de carbone) au même titre que les écosystèmes</li> <li>• Utiliser des agents catalytiques plutôt que des procédés stœchiométriques</li> <li>• Concevoir des produits chimiques qui se décomposent en déchets inoffensifs et biodégradables en fin de vie</li> <li>• Élaborer des processus chimiques qui ne modifieront pas les substances et leur état physique de sorte à créer des émanations, explosions, de la bioaccumulation, etc.</li> </ul>		
	Réduction et/ou compensation des émissions de gaz à effet de serre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Électrifier les équipements de production, manutention, transport</li> <li>• Utiliser des énergies renouvelables dans les procédés, notamment ceux reposant sur l'application de chaleur</li> <li>• Instaurer des puits de carbone</li> <li>• Réutiliser et/ou valoriser les ressources</li> </ul>	<p>Santé et qualité de vie</p> <p>Protection de l'environnement</p> <p>Préservation de la biodiversité</p> <p>Production et consommation responsables</p>	S. O.



	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Favoriser des procédés/processus à circuit fermé</li> <li>Utiliser de nouvelles technologies à faible émission</li> <li>Capter le CO<sub>2</sub></li> </ul>		
	Faible consommation énergétique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliser des énergies renouvelables dans les procédés</li> <li>Récupérer la chaleur perdue dans les procédés</li> <li>Faire la maintenance des équipements</li> <li>Réutiliser et/ou valoriser les ressources</li> <li>Utiliser de nouvelles technologies à faible consommation énergétique</li> </ul>	Protection de l'environnement Production et consommation responsables	La nature capte et utilise l'énergie efficacement et dépend d'une énergie librement accessible et renouvelable
	Symbiose ou écologie industrielle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Boucler les flux de matières et d'énergie en transformant les matières résiduelles d'une industrie ou d'un procédé en ressources primaires pour une autre industrie ou un autre procédé</li> <li>Minimiser les pertes de ressources et matériaux durant leur cycle de vie</li> <li>Utiliser des énergies renouvelables et éliminer ou réduire la consommation d'énergies fossiles</li> <li>Améliorer les procédés et maximiser l'utilisation des</li> </ul>	Santé et qualité de vie Protection de l'environnement Préservation de la biodiversité Respect de la capacité de support des écosystèmes Production et consommation responsables	La nature capte et utilise l'énergie efficacement et dépend d'une énergie librement accessible et renouvelable La nature exploite les déchets comme ressources La nature s'approvisionne localement La nature optimise plutôt que maximise La nature se diversifie et coopère afin d'exploiter

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
		ressources pour réduire les flux de matières et d'énergie <ul style="list-style-type: none"> <li>Promouvoir l'économie de fonctionnalité ; favoriser un service plutôt qu'un produit</li> <li>Réduire l'utilisation de matières et d'énergie dans la fabrication du produit</li> <li>Avoir une synergie avec une ou plusieurs autres entreprises</li> </ul>		au plein potentiel son milieu La nature utilise les ressources rares et matériaux avec parcimonie La nature maintient un équilibre avec la biosphère
	Milieu de vie de qualité	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maintenir la qualité des sols, de l'eau et/ou de l'air</li> <li>Maintenir une biodiversité</li> <li>Assurer un milieu de vie tranquille et sécuritaire</li> <li>Maintenir la qualité du paysage</li> <li>Assurer un milieu de développement sain</li> </ul>	Santé et qualité de vie Protection de l'environnement Respect de la capacité de support des écosystèmes Production et consommation responsables	S. O.
Sociale	Choix de consommation responsables	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consommer local</li> <li>Recycler ou composter</li> <li>Acheter auprès d'entreprises à caractère sociales</li> <li>Acheter des produits ayant un faible impact environnemental</li> <li>Acheter des produits éthiquement responsables envers les animaux</li> <li>Réduire sa consommation (minimaliste)</li> <li>Consommer et acheter des produits équitables et/ou biologiques</li> </ul>	Santé et qualité de vie Participation et engagement Protection de l'environnement Production et consommation responsables	La nature capte et utilise l'énergie efficacement et dépend d'une énergie librement accessible et renouvelable La nature exploite les déchets comme ressources La nature s'approvisionne localement La nature se diversifie et coopère afin d'exploiter

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliser le transport collectif ou opter pour la mobilité durable</li> <li>• Prioriser une économie collaborative et/ou de fonctionnalité</li> <li>• Diminuer la consommation énergétique et des ressources (eau)</li> </ul>		au plein potentiel son milieu
	Adoption de saines habitudes de vie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adopter des habitudes alimentaires saines (consommation de fruits et légumes, alimentation diversifiée, grande consommation d'eau, etc.)</li> <li>• Adopter un mode de vie actif (exercice chaque jour, bonne posture, étirement, etc.)</li> <li>• Adopter de bonnes habitudes de sommeil</li> <li>• Diminuer la consommation de substances représentant un risque pour la santé (drogues, alcool, tabac, etc.)</li> </ul>	Santé et qualité de vie Production et consommation responsables	S. O.
	Mode de vie de qualité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adopter des habitudes de consommation saines</li> <li>• Assurer la mise en valeur du patrimoine culturel et naturel</li> <li>• Favoriser des occupations saines</li> <li>• Assurer la santé, sécurité et/ou l'éducation de la population</li> <li>• Assurer un équilibre entre travail, pratiques sociales et autres occupations</li> </ul>	Santé et qualité de vie	S. O.

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Satisfaire les besoins de base (se loger, se nourrir, se vêtir)</li> </ul>		
	Renforcement des connaissances sur les écosystèmes et les différentes espèces	<ul style="list-style-type: none"> <li>Encourager les recherches sur le sujet</li> <li>Réaliser des caractérisations de milieux naturels et publier les rapports</li> <li>Offrir des formations</li> <li>Informar la population de son rôle dans la protection des écosystèmes et des espèces</li> <li>Échanger des informations sur le sujet entre différents experts</li> </ul>	Santé et qualité de vie Participation et engagement Protection de l'environnement Accès au savoir Préservation de la biodiversité Production et consommation responsables	La nature fonctionne à partir d'informations
	Multidisciplinarité	<ul style="list-style-type: none"> <li>Décloisonner les savoirs</li> <li>Travailler en collaboration avec des experts de différents domaines</li> <li>Adopter une approche systémique</li> </ul>	Participation et engagement	La nature se diversifie et coopère afin d'exploiter au plein potentiel son milieu La nature fonctionne à partir d'informations
Économique	Création d'emplois ou maintien d'emploi de qualité	<ul style="list-style-type: none"> <li>Supporter le développement de compétences nouvelles</li> <li>Supporter le partage des compétences et connaissances</li> <li>Offrir des conditions de travail valorisantes et qui permettent l'intégration</li> <li>Valoriser la collaboration</li> </ul>	Efficacité économique Équité et solidarité sociales Accès au savoir	S. O.
	Économie circulaire, collaborative et/ou sociale	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recycler les ressources et matériaux</li> <li>Réduire la consommation de ressources</li> </ul>	Santé et qualité de vie Équité et solidarité sociales Participation et engagement	La nature capte et utilise l'énergie efficacement et dépend d'une énergie

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliser une démarche d'éco-conception dans la production des produits</li> <li>• Favoriser l'écologie industrielle</li> <li>• Prioriser une économie de fonctionnalité et/ou collaborative</li> <li>• Assurer la durabilité de l'extraction, l'exploitation et l'achat des ressources</li> <li>• Supporter une consommation responsable</li> <li>• Allonger la durée d'usage du produit</li> <li>• Partager ou échanger des biens, services, connaissances selon une approche de mutualisation</li> <li>• Adopter une gouvernance entrepreneuriale démocratique des membres</li> <li>• Répondre aux besoins de la collectivité et des membres</li> <li>• Aspirer à une viabilité économique</li> <li>• Vendre ou échanger des biens ou services qui permettent d'améliorer le bien-être de la collectivité</li> <li>• Supporter la création d'emplois de qualités et durables</li> </ul>	Protection de l'environnement Efficacité économique Préservation de la biodiversité Production et consommation responsables Respect de la capacité de support des écosystèmes Production et consommation responsables	librement accessible et renouvelable La nature exploite les déchets comme ressources La nature s'approvisionne localement La nature optimise plutôt que maximise La nature se diversifie et coopère afin d'exploiter au plein potentiel son milieu La nature fonctionne à partir d'informations La nature utilise les ressources rares et matériaux avec parcimonie La nature maintient un équilibre avec la biosphère
	Valeur des services écosystémiques et les	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restaurer les écosystèmes</li> <li>• Prioriser les écosystèmes naturels aux innovations technologiques</li> </ul>	Protection de l'environnement Accès au savoir	La nature se diversifie et coopère afin d'exploiter

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
	connaissances que nous en avons	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluer la valeur économique des services écosystémiques pouvant ou ayant été affectés par les activités anthropiques</li> <li>• Réaliser une analyse économique comparative du remplacement d'un écosystème naturel par des innovations technologiques</li> <li>• Encourager les recherches sur le sujet</li> <li>• Offrir des informations sur le sujet</li> </ul>	Efficacité économique Préservation de la biodiversité Production et consommation responsables Respect de la capacité de support des écosystèmes Production et consommation responsables	au plein potentiel son milieu La nature fonctionne à partir d'informations. La nature maintient un équilibre avec la biosphère La nature adapte la forme à la fonction pour ne pas épuiser les ressources
	Partage de la richesse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Favoriser l'accès et l'usage collectif aux biens et services</li> <li>• Optimiser les retombées économiques</li> <li>• Diminuer la disparité dans les revenus</li> <li>• Limiter l'appropriation des biens communs par un petit groupes de personnes</li> <li>• Assurer une répartition équitable des avantages</li> </ul>	Santé et qualité de vie Équité et solidarité sociales Efficacité économique	S. O.
	Niveau de vie de qualité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Offrir une possibilité de mobilité sociale</li> <li>• Assurer un bien-être matériel minimal</li> <li>• Favoriser l'accès à des biens et services de qualité et en quantité suffisante</li> </ul>	Santé et qualité de vie Équité et solidarité sociales Efficacité économique	S. O.

	Critère	Pratiques/Actions	Principe(s) de la Loi	Principe(s) du biomimétisme
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Assurer un échange équitable entre le revenu et le travail des personnes</li> <li>Offrir la possibilité d'utilisation des ressources à tous</li> </ul>		
	Réduction des externalités économiques négatives	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intégrer les coûts sociaux et environnementaux du projet dans le prix</li> <li>Participer au marché du carbone</li> <li>Réduire les coûts de construction, d'exploitation et de maintenance sans affecter une tierce partie</li> </ul>	Efficacité économique	S. O.